كيف تعلّم كلبتك الفيزياء الكمية

ترجمة: موسى جعفر

تشاد أورزيل

أخبار العلوم
الأدب

كيف تعلم كلبتك الفيزياء الكمية

تشاد أورزيل



ترجمة: موسى جعفر

أخبار العلوم قرطاس الأدب

كيف تعلم كلبتك الفيزياء الكمية

«ساحر! يا لها من طريقة مرحة ومسلية للتعرف على إحدى ركائز العلم الحديث»

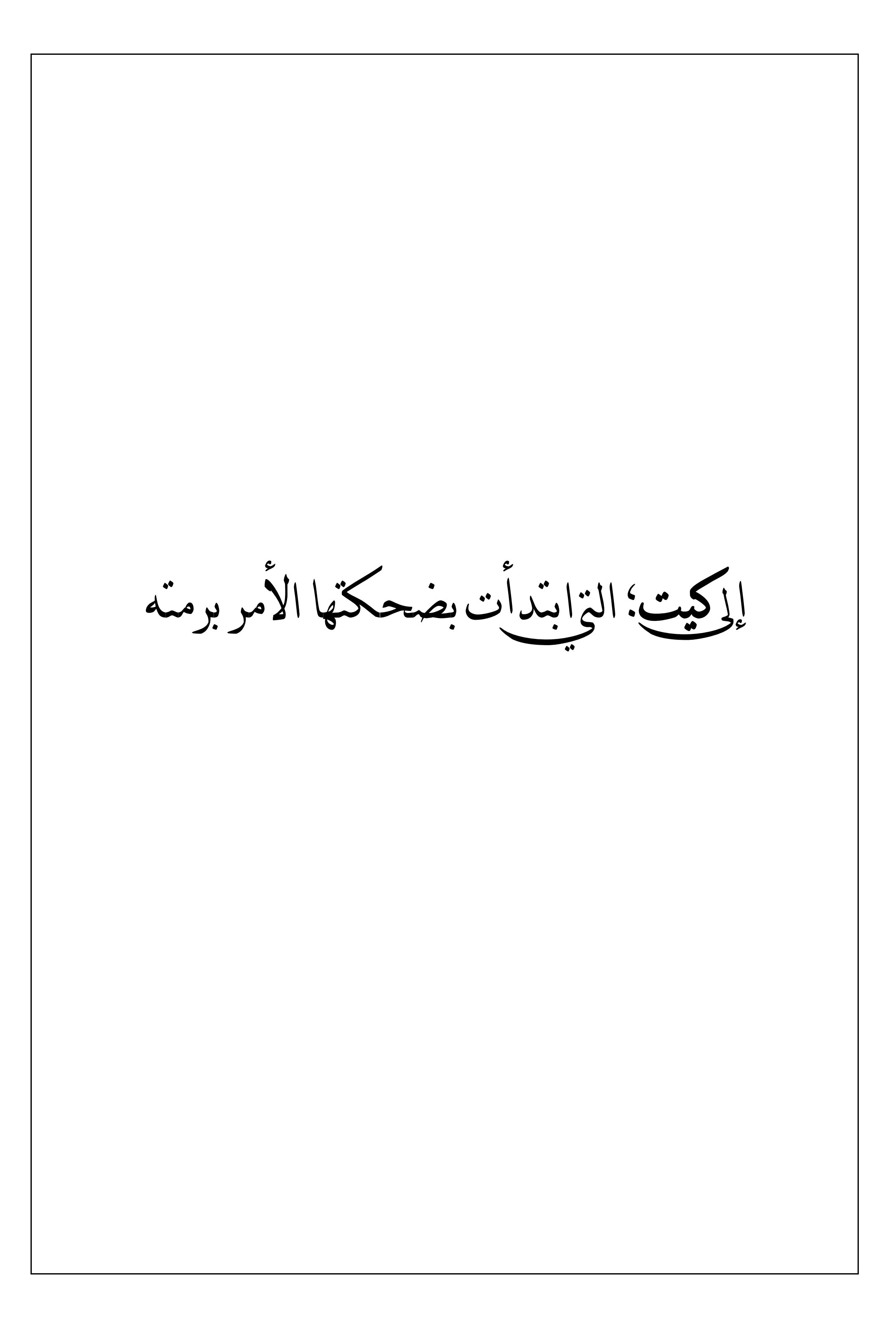
وليام فيليبس (حائز على جائزة نوبل في الفيزياء)

«مدخل ممتع خفيف إلى بعض أعقد أحاجي الفيزياء الحديثة. وإيمي متألقة»

د. شون كارول (مؤلف كتاب *من الأبدية إلى هنا: السعي لنظرية الزمن النهائية*)

«يشرح المؤلف الجسيمات الافتراضية والتشابك والانتقال الفوري الكميين بطريقته الظريفة. لربما يجد القراء العازفون عن الفيزياء المشروحة للعامة في السنين الأخيرة متعة حقيقية في نقاشه المبهج»

مجلة بابليشرز ويكلي



إلى كيت؛ التي ابتدأت بضحكتها الأمر برمته

المحتويات

الفصل الثالث

الفصل الرابع

الفصل الخامس

الفصل السادس

الفصل السابع

الفصل الثامن

الفصل التاسع

الفصل العاشر

كلمة المترجم

إن كان هذا أول كتاب فيزيائي تريد قراءته، فلا تقرأه. أفضِّل أن يكون القارئ مطلعًا على التاريخ الفيزيائي ولو ببساطة ليستوعب جميع الأفكار الواردة فيه، وإلا فإنه سيحتاج إلى تركيز غير قليل.

ستصادف وأنت تقرأ كلمات ظللتها باللون الأزرق، هذه مصطلحات علمية تجد تعريفها في معجم المصطلحات المهمة في آخر الكتاب.

إن كنت مهتمًا بالعلوم تابع صفحتنا أخبار العلوم، التي نترجم فيها آخر الأخبار العلمية والاجتماعية. وإن كنت من هواة الأدب، ننصحك بقرطاس الأدب. وإن لم تكن مهتمًا بأي من الاثنين فأغلق الكتاب، كيف وصل إليك أساسًا!

فيما يخص الاستخدام التجاري: هذه الترجمة غير ربحية بالكامل، الهدف منها علمي بحت. ولا نمانع أن تطبعها دور النشر دون مقابل للترجمة، شرط ألا يمانعوا هذه النسخة الإلكترونية عند تحصيلهم حقوق النشر من الدار الأجنبية.

موسى جعفر أبو سعود

تمهيد

مدخل إلى ميكانيك الكم: لِمَ التحدث إلى كلبتك عن الفيزياء؟

عبَّدت جمعية موهوك-هدسون الإنسانية طريقًا في الغابة القريبة من مقرّها في مدينة تروي التابعة لولاية نيويورك. وذلك ليستطيع من يرغب في التبني التمشي مع الكلب الذي يفكر في أخذه. تمشيت عبره مع كلبة وقعدت على مقعد في منطقة مفتوحة من الغابة لأراقبها. ربضتْ هي على الأرض بقربي ونكزت كفي بأرنبة أنفها؛ ففركت خلف أذنيها.

عاينت وزوجتي كيت الكثير من الكلاب سابقًا، لكني أتيت بمفردي هذه المرة لانشغالها بالعمل؛ على أي حال أرى هذه الكلبة مناسبة. فهي تبلغ نحو عام، وهجينة من سلالة الراعي الألماني وسلالة أخرى؛ لها لوني الراعي الألماني الأسود والبني، لكنها أصغر منه قليلًا وأذنيها ألين. تقول البطاقة على قفصها إن اسمها أميرة، لكني لا أراه ملائمًا.

- ماذا تقولين يا فتاة؟ ماذا أسميكِ؟

- نادني إيمي!

- لماذا إيمي؟

- لأنه اسمي، أيها السخيف.

[من المفاجئ أن تناديني كلبة بالسخيف، لكن معها حق]

- لا أستطيع الجدال ما دام كذلك. أتودين العيش معنا يا إيمي؟

- حسنًا، الأمر يعتمد. هل هناك مخلوقات لأطاردها؟ أنا أحب مطاردة الأشياء.

- نعم. إن لنا حديقة رحبة فيها كثير من السناجب والطيور، وحتى الأرانب.

هزت ذيلها سعادةً وقالت: «مرحى! أحب الأرانب»، وأضافت: «ماذا عن النزه؟ هل ستنزهني؟».

- بالتأكيد.

- والمقرمشات؟ أحب المقرمشات.

- ستحصلين عليها ما دمتِ جيدة.

امتعضت قليلًا من كلامي وقالت: أنا كلبة رائعة، وستعطيني المقرمشات! على أي حال، لم تقل لي، ما هي وظيفتك؟

- ماذا! من يقيم الآخر هنا؟

- يجب أن أعرف إن كنت تستحق كلبةً رائعة مثلي! ماذا تعمل؟

[أظن الآن أن اسم أميرة يناسبها أكثر مما تصورت]

- لا بأس؛ إن لي زوجةً اسمها كيت تعمل محامية. وأنا أستاذ فيزياء في جامعة يونيون في سكنيكتادي. أدرِّس الفيزياء الذرية والبصريات الكمية وأبحث فيهما.

- بصريات ماذا؟

- البصريات الكمية، تُعرَّف عمومًا بأنها دراسة التفاعل بين الضوء والذرات، مع وصف إحداهما أو كليهما باستخدام الفيزياء الكمية.

- تبدو معقدة.

- وهي كذلك بالفعل، لكن هذه الأشياء ساحرة. تشتمل الفيزياء الكمية على شتى الخصائص الغريبة والعجيبة. فالجزيئات تتصرف كموجات والموجات كجسيمات، وخصائص الجسيمات غير محددة إلى أن نقيسها. والفضاء الفارغ مملوء بجسيمات افتراضية تظهر إلى الوجود وتختفي. إنه علم رائع.

همهمت وعلى محياها سيماء المفكرين، وأردفت: «اختبار أخير». ثم استلقت على ظهرها قائلة: «افرك بطني».

فعلت كما قالت، وبعد دقيقة، نهضت وهزت جسمها وأعلنت: «حسنًا، أنت جيد جدًا، هلم إلى المنزل».

اتجهنا إلى مأوى الكلاب لأملأ أوراق التبني، وبينما نحن في الطريق قالت: «قلت لي الفيزياء الكمية؟ عليَّ تعلم شيء منها».
- يسعدني أن أشرحها لكِ لاحقًا.

• • •

أتحدث إلى كلبتي كثيرًا كما يفعل معظم مالكي الكلاب. محادثاتنا تقليدية بمعظمها كأن لا تأكلي هذا ولا تتسلقي ذاك وهيا نتنزه؛ لكن بعضها يدور حول الفيزياء الكمية.

قد تسأل لماذا أتحدث مع كلبتي عن ميكانيك الكم؟ والجواب ينبع من كوني أستاذًا جامعيًا، فأنا أمضي الكثير من الوقت مفكرًا في الفيزياء الكمية التي أُدرِّسُها.

ما هي الفيزياء الكمية؟

إنها أحد فروع الفيزياء الحديثة، أي الفيزياء التي تعتمد على القوانين المكتشفة منذ القرن العشرين تقريبًا. أما القوانين والمبادئ الفيزيائية المطوَّرة قبل ذلك فتعدُّ فيزياءَ كلاسيكية.

الفيزياء الكلاسيكية هي فيزياء الأجسام المألوفة، مثل كرات التنس ومكعبات الثلج والمواقد والمغانط والتوصيل الكهربائي السلكي. تحكم قوانين الحركة الكلاسيكية حركةَ كل ما يمكن رؤيته بالعين المجردة، وتفسر الديناميكا الحرارية الكلاسيكية آليةَ عمل المحركات والمبردات واكتسابَ الأجسام الحرارة وفقدانها لها، وتوضح قوانين الكهرومغناطيسية الكلاسيكية سلوكَ المغانط ومصباح الإنارة والمذياع.

أما الفيزياء الحديثة فتصف العالم الأغرب الذي نراه عندما ننظر عميقًا في الأجسام المألوفة. برز هذا العالم لأول مرة في تجارب أجريت نهاية القرن التاسع عشر ومطلع القرن العشرين، حين وجب تطوير فروع جديدة ذات قوانين مختلفة، لعجز المعادلات الفيزيائية الكلاسيكية عن تفسير تلك التجارب.

تتفرع الفيزياء الحديثة إلى فرعين يمثلان هجرة لا عودة فيها من القواعد الكلاسيكية. الفرع الأول هو النظرية النسبية، التي تعنى بما يتحرك بسرعات عالية جدًا أو تؤثر فيه قوى جاذبة شديدة. وضع ألبرت آينشتاين هذه النظرية في العام 1905، ومع أنها فرع ساحر فإنها ليست موضوع كتابنا.

الفرع الثاني من الفيزياء الحديثة هو محور هذا الكتاب وما أحدث كلبتي عنه. يسمى هذا الفرع الفيزياء الكمية أو ميكانيك الكم[1]، وهو يعنى بدراسة الضوء والأشياء الصغيرة جدًا مثل الجزيئات والذرات والأجسام دون الذرية.

صاغ ماكس بلانك كلمة الكم عام 1900، ونال آينشتاين جائزة نوبل لتقديمه أول نظرية كمية عن الضوء[2]. طوِّرت النظرية الكاملة لميكانيك الكم في الثلاثين سنة اللاحقة أو ما يقاربها. وتسللت بعض مفاهيمها من الكتب لتعلق في مخيلة العامة، مثل مبدأ الريبة لفيرنر هايزنبيرغ، ومفارقة قطة إرفين شرودنغر، وتفسير العوالم المتعددة لهيو إيفرت.

مطورو الفيزياء الكمية، من روادها الأوائل أمثال بلانك، ونيلز بور الذي وضع أول نموذج كمي لذرة الهيدروجين، إلى المبدعين اللاحقين أمثال ريتشارد فاينمان وجوليان شفينجر اللذين استنبطا (كلٌّ على حدا) ما يعرف اليوم بنظرية الكهروديناميكا الكمية (الديناميكا الكهربائية الكمية)، يعدون جميعًا عمالقة الفيزياء باستحقاق.

---

[1] الفيزياء الكمية والنظرية الكمية وميكانيك الكم هي مصطلحات مترادفة لنفس العلم.

[2] كان وضع آينشتاين للنظرية النسبية شيئًا حسنًا، لكن السبب الرسمي لحصوله على جائزة نوبل كان نظريته الكمية عن التأثير الكهروضوئي.

يستحيل وجود الحياة المعاصرة التي نعرفها لولا ميكانيك الكم؛ فلا يمكننا صنع الرقائق الحاسوبية من أشباه الموصلات بلا فهم الطبيعة الكمية للإلكترون، ولا صنع الليزر الذي نستخدمه لإرسال الرسائل عبر خطوط الاتصال المتكونة من الألياف الضوئية دون فهم الطبيعة الكمية للضوء والذرات.

بل يتجاوز تأثير الفيزياء الكمية في العلم الجانب العملي، فهي تقحم الفيزيائيين في مشاكل فلسفية! إنها تضع حدودًا لما يمكن معرفته عن الكون وخصائص أجسامه؛ وتغير فهمنا لمعنى إجراء عملية قياس أو رصد؛ وتلزمنا بإعادة نظر شاملة جوهرية في الواقع من أعمق مستوياته.

يصف ميكانيك الكم عالمًا غريبًا تمامًا حيث لا حتمية لشيء ولا خصائص ثابتة للأجسام إلى أن تقيسها. عالمًا تترابط فيه الأشياء البعيدة بطرائق عجيبة، وتجاور كوننا أكوانٌ كاملة بتواريخ مختلفة، وتظهر «الجسيمات الافتراضية» وتختفي فيما يبدو فضاءً فارغًا!

لا تظننَّ النظرية الكمية خيالًا علميًا أو ما شاكله لغرابتها، فهي علم. والعالم الذي تصفه إنما هو عالمنا في المستوى الصغروي[3] وما التأثيرات الغريبة التي تتنبأ بها النظرية إلا حقيقة ذات نتاجات تطبيقية.

لقد اختبرت هذه النظرية بدرجة تجعلها أنجح النظريات اختبارًا في تاريخ النظريات العلمية، ونتاجاتها ذات دقة منقطعة النظير، وحتى أغرب توقعاتها قد ثبت تجريبيًا (كما سنرى في الفصل السابع والثامن والتاسع).

---

[3] تعني كلمة الصغروي (الميكروي) للفيزيائيين كل ما هو أدق من أن تستطيع العين المجردة رؤيته. وهذا يشمل البكتيريا والذرات والإلكترونات وغيرها. إنه مصطلح فضفاض كما ترى لكن الفيزيائيون يعتقدون أن من المحير وضع أكثر من كلمة للأشياء الصغيرة.

ما علاقة الفيزياء الكمية بالكلاب؟

اعلمْ أن للكلاب أفضلية على البشر في مجال الفيزياء الكمية. فهي تعيش العالم بتصورات سابقة أقل من البشر، وتتوقع غير المتوقع دائمًا. يمكن لكلبة أن تتمشى يوميًا في ذات الشارع مدة سنة كاملة، لكن ستكون كل مرة كأنها الأولى لها: ستشم كل صخرة، وكل عشبة، وكل شجرة كما لو لم تشمها من قبل.

سيفزع الإنسان إن ظهرت مقرمشات كلاب في وسط المطبخ فجأة من العدم، لكن كلبةً ستتوجه إليها مسرعة. في الواقع، سيكون ظهور المقرمشات المفاجئ مسوغًا عند معظم الكلاب، فهي دائمًا تتوقعها بلا سبب. يحير ميكانيك الكم الناس ويعكر صفوهم لأنه يعارض توقعاتهم العقلانية عن آلية عمل العالم. الكلاب على النقيض منهم، جمهور أكثر تقبلًا. فالعالم اليومي غريب عجيب للكلب، وما توقعات ميكانيك الكم عنده بأغرب من آلية عمل مقبض الباب مثلًا[4].

تساعدني مناقشة الفيزياء الكمية مع كلبتي في فهم كيف أشرحها للبشر. تعلُّمُ أن تفكر مثل كلب لجزء من دراسة ميكانيك الكم. فإن استطعت النظر إلى العالم كما ينظر إليه كلب، أي مصدرًا لمفاجآت وتساؤلات لا نهائية، ستكون الفيزياء الكمية أسهل هضمًا.

في طيات هذا الكتاب مجموعة محاورات بيني وبين كلبتي بخصوص الفيزياء الكمية. كل منها متبوع باستعراض مفصل للفيزياء التي ذكرت في المناقشة بطريقة تهدف لإمتاع القارئ.

---

[4] وهو يتبع القوانين الكلاسيكية بالطبع، لكنه يتطلب كفًا تستطيع الإمساك بالأشياء (كف البشر ذات الإبهام المعاكس).

تتنوع مواضيع الكتاب بين الأفكار الشائعة، منها الازدواجية الموجية الجسيمية (الفصل الأول) ومبدأ الريبة (الفصل الثاني)، وصولًا إلى الأفكار الأكثر تقدمًا مثل الجسيمات الافتراضية ونظرية الكهروديناميكا الكمية (الفصل التاسع). تتضمن التفسيرات استعراضًا للتوقعات الغريبة للنظرية (الفلسفية والعملية) وللتجارب التي أثبتتها. وقد اختيرت حَسب ما يجده الكلب مثيرًا والإنسان مفاجئًا.

• • •

- لا أعلم. أظن أنه بحاجة إلى المزيد.
- المزيد من ماذا؟
- المزيد مني. فأنت لا تتحدث عن حقيقة أني كلبة نابغة!
- حسنًا، لكن...
- ولا تنسَ الكفاءة. أنا أفضل كثيرًا من تلك الكلاب الأخرى.
- أي كلاب أخرى؟
- الكلاب التي ليست أنا.
- اسمعي، هذا الكتاب عن الفيزياء لا عنكِ.
- لا بأس، كل ما أقوله إن عليه الاهتمام بي أكثر.
- لن يفعل، تعايشي مع الأمر.
- حسنًا، طيب... بالمناسبة، أنت تحتاج إلى مساعدتي في الأشياء الفيزيائية.
- كيف ذلك؟
- أنت تهمل بعض الأشياء أحيانًا، ولا تجيب عن جميع أسئلتي. حري بك ألا تفعل ذلك.
- مثل ماذا؟ أعطني شاهدًا.
- مم... لا يخطر لي شيء حاليًا. لكنك إن قرأته علي سأشير إليها وأساعد في إصلاحها.
- حسنًا يبدو عادلًا. إليكِ ما سنفعله، سنراجع الكتاب معًا، وحدثيني عن

المواضع التي تظنين أني قصرت فيها، وسأضع تعليقاتك في الكتاب.
- سنتحدث عنها كما نفعل حاليًا؟
- نعم، كما نفعل حاليًا.
- وستضع المحادثة في الكتاب؟
- نعم، سأضعها.
- في هذه الحالة، يجدر بنا الحديث عن كم أنا رائعة وظريفة ويجب أن أحصل على المزيد من المقرمشات و...
- كفاك.
- مؤقتا وحسب...

الفصل الأول

من أي طريق؟ كليهما: الازدواجية الموجية الجسيمية

كنت أُنزِّه إيمي حين مر سنجاب في الطريق، وما إن لمحته إيمي حتى انطلقت في إثره لتصيده. هرب السنجاب مذعورًا إلى حديقة والتف حول شجرة قيقب صغيرة موضوعة للزينة؛ لكن إيمي ما التفت ولا غيرت مسارها بأي شكل من الأشكال! سحبتها بسرعة قبل أن تصدم الشجرة، فجازتني بتعابير سخط وكلمات عتب: «لم فعلت هذا؟»

- ماذا تعنين! لقد كنت على وشك الاصطدام بالشجرة، وأنا أنقذتك.

قالت «لم أكن كذلك...»، ونَظَرَت إلى السنجاب الذي ابتعد وارتقى شجرة أكبر في الجانب الآخر من الحديقة ثم أردفت «بفضل الكم».

عدنا للتنزه فقلت لها: «يجدر بكِ البدء بشرح مقصدك».

- حسنًا، لدي هذه الخطة... أنت تعلم أني لا أستطيع صيد الأرانب حين أطاردها في الحديقة الخلفية، لأني حين التف إليها من يمين البركة فإنها تذهب يسارًا وتهرب؟

- نعم.

- وتعلم أني حين أركض نحوها ملتفةً من يسار البركة فإنها تهرب يمينًا؟

- نعم.

- لقد خططت لطريقة جديدة للركض، حتى لا تستطيع الأرانب الإفلات مني.

- ما الطريقة، عبور البركة ذاتها؟

[البركة بعمق 20 سنتمترًا وطول يقارب المتر]

- لا يا سخيف. بل سأركض في الاتجاهين معًا، وأحصر الأرانب بيني وبيني.

- حسنًا... هذه... نظرية مثيرة!

- إنها ليست نظرية، إنها الفيزياء الكمية. إذ للجسيمات المادية طبيعة موجية، وتستطيع الحيود (الالتفاف) حول العوائق. إن أطلقت إلكترونات باتجاه حاجز ما فإنها ستلتف حوله من اليمين واليسار في ذات الوقت. وأنا سأستغل طبيعتي الموجية وأعبر البركة من الجانبين معًا.

[بلغ بها التركيز في الفكرة حد أنها لم تلحظ القطة التي تتشمس في الحديقة المقابلة]

- وما علاقة الاندفاع المباشر نحو شجرة بهذه الفكرة؟

- حسنًا؛ فكرت بتجريبها على شيء أصغر أولًا، لقد كنت أركض على نحو جيد، وكنت على وشك الالتفاف حين أوقفتني.

- كما قلت، النظرية مثيرة، لكنها لن تنجح.

- لن تقول إنني لا أملك طبيعة موجية، أليس كذلك؟ لأنني أملكها، هذا مذكور في كتبك الفيزيائية.

- لا لا، بل لديك طبيعة موجية بالفعل، ولديك كذلك طبيعة بوذية...

- أنا كلبة متنورة!

- ... وهي لن تنفعك أكثر من الطبيعة الموجية في هذا الموضوع. الشجرة كبيرة كما تعلمين، وطولك الموجي قصير. وحين تتحرك كلبة مثلك تزن 20 كيلوغرامًا بسرعة طبيعية فإن طولها الموجي سيكون نحو 10^{-35} متر. بغية الحيود حول شجرة، يجب أن يكون طولك الموجي مساويًا لطولها الموجي الذي ربما يبلغ عشرة سنتيمترات. والفارق كما ترين كبير.

- إذًا سأغيِّر طولي الموجي عبر تغيير زخمي؛ يمكنني الركض بسرعة كبيرة.

- محاولة جيدة، لكن كلما زادت السرعة قَصَرَ الطول الموجي، والعكس صحيح. أي إن أردت جعل طولك الموجي يقارب المليمتر الذي عليك بلوغه للانحراف حول شجرة، عليك التحرك بسرعة 10^{-30} متر في الثانية. تلك السرعة بطيئة جدًا لدرجة إنك ستستغرقين مليار سنة لعبور نواة ذرة ما! لذا لن تساعدك في صيد الأرانب.

- أتقول إنني بحاجة إلى خطة جديدة؟

- أنت بحاجة إلى خطة جديدة.
[أخفضت ذيلها ومشينا في صمت ثوانيَ قليلة]
- حسنًا، هل يمكنك مساعدتي في خطتي الجديدة؟
- سأحاول.
- كيف لي استغلال طبيعتي البوذية لأعبر البركة من كلا الجانبين في ذات الوقت؟

لم أستطع التفكير في إجابة لهذا السؤال، لكن أنقذني أني لمحت فراءً رماديًا فصحت «انظري! سنجاب!»، وعدنا إلى المطاردة.

• • •

للفيزياء الكمية جوانب غريبة وفاتنة كثيرة، كان محرك هذه النظرية الازدواجية الموجية الجسيمية، وهي حقيقة أن لكل من الضوء والمادة خصائص جسيمية وموجية معًا. إذ تبين أن الضوء -الذي ظُنَّ أنه موجة- يتصرف مثل سيل من الجسيمات في بعض التجارب. وتبين أن الإلكترونات -التي ظُنَّ أنها جسيمات- تتصرف مثل الموجات في بعض التجارب.

مع أن خصائص الموجات والجسيمات تبدو متناقضة، فإن كل شيء في الكون هو جسيم وموجة في ذات الوقت! توقدت شعلة هذه النظرية في بداية القرن العشرين، حين اُكتشف تصرف الضوء كجسيم.

نستعرض في هذا الفصل تاريخ اكتشاف العلماء لهذه الازدواجية الغريبة. ولتقدير مدى غرابة هذا الاكتشاف، علينا أولًا الحديث عن الجسيمات والموجات التي نراها يوميًا.

الموجات والجسيمات حولك: الفيزياء الكلاسيكية

إن سلوك الجسيمات المادية أمر مألوف لنا جميعًا. تسلك معظم الأجسام التي نراها -العظام والكرات والألعاب الصارَّة[1] إلخ- سلوك الجسيمات بالمعنى الكلاسيكي، وتحسب حركتها بالفيزياء الكلاسيكية. نعم إن لها أشكالًا مختلفة، لكن يمكن التنبؤ بحركتها الأساسية بتخيل أنها كرات صغيرة مصمتة ذات كتلة وتطبيق قوانين نيوتن في الحركة[2]. ومع أن حركة كرة المضرب تختلف عن حركة العظمة في الهواء، فإن الفيزياء الكلاسيكية تتيح لنا التنبؤ بموقع سقوط كل منهما، والذي سيكون نفسه إن رميتا بنفس السرعة والاتجاه (وعند ذات الظروف).

تتميز الجسيمات بموقع محدد (تعرف أين الجسيم بالضبط)، وسرعة محددة (تعرف السرعة التي يتحرك بها وفي أي اتجاه)، وكتلة محددة (تعرف كم يزن). ويمكنك معرفة زخمها بضرب الكتلة بالسرعة. على سبيل المثال، زخم كلب لابرادور ضخم أكبر من زخم كلب بودل فرنسي صغير إن تحركا بذات السرعة (لأن كتلته أكبر)؛ وزخم كلب مسرعٍ من نوع بوردر كولي أكبر من زخم كلب صيد باسط يتهادى في مشيته إن كانت كتلتهما متساوية (لأن سرعته أعلى). يُحدِّد الزخم ما سيحدث عند تصادم جسيمين: حين يصدم جسمٌ متحركٌ جسمًا ساكنًا، ستقل سرعة الأول (لخسارته زخمًا) وستزيد سرعة الثاني (لاكتسابه زخمًا).

---

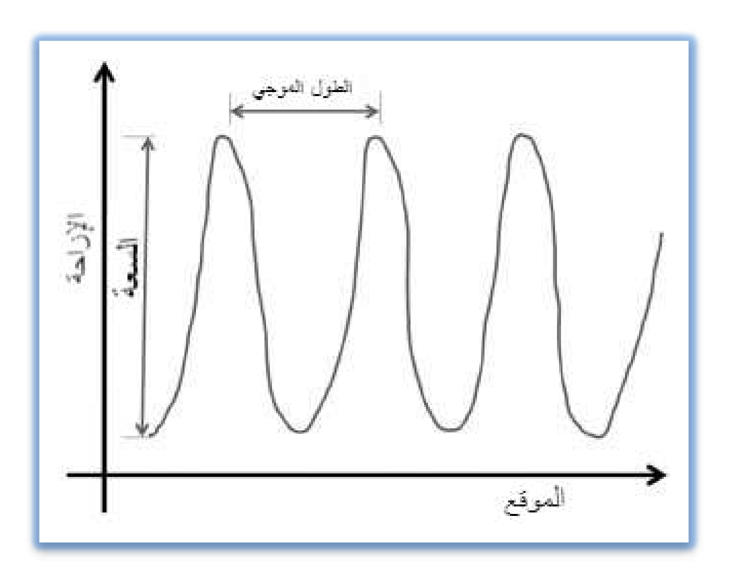
[1] ألعاب الكلاب والأطفال التي تصدر صريرًا حين تُضغط أو تُعض.

[2] وضع السير إسحاق نيوتن ثلاثة قوانين في الحركة تحكم سلوك الأجسام المتحركة. أول قانون هو مبدأ القصور الذاتي ونصه «يظل الجسم الساكن ساكنًا، والمتحرّك متحركًا، ما لم تؤثر فيهما قوة خارجية». القانون الثاني يكتب عادة بصيغة «القوة= الكتلة* التعجيل»، القوة تساوي حاصل ضرب الكتلة بالتعجيل. أما القانون الثالث فنصه «إن لكل فعل رد فعل يساويه في المقدار ويعاكسه في الاتجاه». تصف هذه القوانين حركة الأجسام الكبروية المتحركة بسرعات اعتيادية، وهي نواة الفيزياء الكلاسيكية.

تتميز الجسيمات أيضًا بشيء بديهي جدًا، هو إمكانية عدها. إذ تستطيع النظر إلى مجموعة من الأشياء وتحديد عددها بالضبط، مثلًا عظمة ولعبتان وثلاثة سناجب.

أما الموجات فتختلف في هذه الجزئية. الموجة هي اضطراب متحرك في وسط ما، مثال عليها نمط القمم والقيعان المتشكل في بركة حديقة عند رمي حجر فيها. طبيعة الموجات أن تنتشر في منطقة ما من الفضاء، وتشكل نمطًا يتغير ويتحرك مع الزمن. نلاحظ عدم انتقال أجسام فيزيائية في هذه العملية -فالماء يظل في البركة- بل مجرد تغيّرٍ في نمط الاضطراب، ونرى ذلك بهيئة حركة للموجة.

توجد طريقتان مفيدتان للنظر في الموجة بغية فهمها. الأولى هي بالتقاط صورة سريعة لكل الموجة، ثم تدقيق النظر في نمط الاضطراب في الفضاء. سترى بالتدقيق في موجة مفردة، نمطًا دوريًا من القمم والقيعان، كما في الرسم:



سترى بمتابعة النمط أن الوسيط يرتفع وينخفض بكمية معينة، نسميها «سعة الموجة». وإن قست البعد بين قمتين متجاورتين (أو قعرين متجاورين)، تكون قد حسبت «طول الموجة»، وهو أحد الأرقام المستخدمة في وصف الموجات. وإن راقبت جزءًا من النمط الموجي فترة طويلة، وقست عدد المرات الذي تكرر فيه الموجة نفسها في فترة زمنية معلومة، تكون قد حسبت «تردد الموجة». وهو رقم ضروري آخر لوصف الموجات. ويتناسب عكسيًا مع الطول الموجي (كلما زاد الطول الموجي قل التردد، والعكس صحيح).

لفهم التردد أكثر، تخيل أنك تراقب بطة تغط رأسها في ماء بحيرة وترفعه باستمرار. إن راقبتها بدقة، سترى أن الاضطراب الذي تحدثه البطة في البحيرة يكبر ويصغر بانتظام كبير. لأن رأس البطة سيكون عاليًا تارة ومنخفضًا تارة أخرى، لذلك يكون لها نمط حركة زمني يتناسب مع النمط المكاني. والتردد هو عدد المرات التي يعود فيها رأس البطة إلى أقصى ارتفاع له في فترة زمنية ما، مثلًا في دقيقة.

يمكنك الآن رؤية كيف أن الموجات تختلف عن الجسيمات، إذ ليس لها موضع. فالتردد والطول الموجي يصفان النمط عمومًا، وليس هناك مكان محدد يمكن تعريفه بأنه «موضع الموجة».

الموجة بحد ذاتها هي اضطراب منتشر في الفضاء، وليست شيئًا ماديًا له موضع وسرعة محددتين. نعم يمكنك تخصيص سرعة للنمط الموجي عبر مراقبة الوقت اللازم لتحرك قمته (أو قاعه) من مكان إلى مكان آخر، وقسمة المسافة بين المكانين على الزمن، لكن هذه خصيصة للنمط كله لا لموجة بعينها.

علاوة على ذلك، لا يمكن عد الموجات كما نعد الجسيمات: يمكنك جمع عدد القمم والقيعان المتواجدة في منطقة محددة، لكنها ليست غير جزء من نمط موجي واحد. وهنا يكمن الاختلاف الثاني بين الموجات والجسيمات: الجسيمات منفصلة فتستطيع القول إن لديك جسيمًا أو

جسيمين أو ثلاثة، لكن الموجات مستمرة فلا تستطيع غير قول إن لديك موجة أو ليس لديك شيء. يمكن أن تختلف الموجات المنفصلة في السعات، لكنها ليست مكممة كما الجسيمات.

واعلم أيضًا أن الموجات لا تجمع بذات الطريقة التي تجمع بها الجسيمات! فأحيانا يكون نتاج جمع موجتين موجة أكبر، وأحيانًا يكون النتاج لا موجة (تختفي الموجتان).

تخيل أن لك مصدري موجات مختلفين في منطقة واحدة، مثل حجرين ترميهما معًا في ماء ساكن. سوف تعتمد النتيجة النهائية لجمع الموجات الناشئة عن هذين المصدرين على طريقة اصطفافهما، فإن تراكبت الموجتان بحيث تقع قمة الموجة الأولى على قمة الموجة الأخرى، ويقع قاعها على قاع الأخرى (تسمى موجات في ذات الطور)، ستكون المحصلة موجة أكبر من الموجتين الأصليتين؛ وإن تراكبت الموجتان بحيث تقع قيعان الأولى فوق قمم الأخرى (تسمى موجات مختلفة الطور)، ستكون المحصلة عدم وجود أي موجة، إذ ستلغيان بعضهما البعض.

تسمى هذه الظاهرة بـ«التداخل»، ولعلها أكبر فرق بين الموجات والجسيمات.

• • •

- لا أعلم... الأمر غريب جدًا. أليس لديك مثال آخر عن التداخل؟ مثال أكثر... كلبية؟

- صدقًا ليس لدي. المشكلة أن الموجات تختلف كثيرًا عن الجسيمات. وتعامل الكلاب والموجات محدود نوعًا ما.

- ماذا عن: يشبه التداخل وضع سنجاب في الحديقة، ثم وضع كلبة في الحديقة، وبعد دقيقة لن تجد سنجابًا هناك؟

- هذا ليس تداخلًا، إنه أقرب للمطاردة. التداخل يشبه أن نضع سنجابًا في الحديقة، ثم نضع سنجابًا آخر بعد ثانية واحدة، لنجد عدم وجود أي سنجاب. لكن إن انتظرنا ثانية إضافية قبل وضع السنجاب الثاني، نجد أن هناك أربعة سناجب.
- حسنًا هذا فائق الغرابة.
- هذا مقصدي.
- أحسنت التوضيح. على أي حال، لماذا نتحدث عن هذه الأشياء؟
- لأنك تحتاجين إلى معرفة بعض الأشياء عن الموجات، لفهم الفيزياء الكمية.
- لكن هذا يشبه الرياضيات. لا أحب الرياضيات. متى سنتحدث عن الفيزياء؟
- نحن نتحدث عن الفيزياء! الهدف الأساسي من هذا العلم استخدام الرياضيات لوصف الكون.
- لا أريد وصف الكون. أريد صيد السناجب.
- سيساعدكِ تعلم كيفية وصف الكون في إمساك السناجب. إن امتلكتِ نموذجًا رياضيًا يصف موقع السناجب الحالي، وعلمتِ القواعد التي تحكم حركة السناجب، يمكنك استخدام نموذجك ذاك للتنبؤ بموقع السناجب المستقبلي. وإن تنبأتِ بموقعها المستقبلي...
- سأصيدها!
- تمامًا.
- حسنًا، لا بأس بالرياضيات. لكني ما زلت أجهل لم نتحدث عن أشياء الموجات هذه.
- لأننا نحتاج إليها في شرح الفقرة التالية...

الموجات المألوفة: الضوء والصوت

نحتك يوميًا بنوعين من الموجات: الضوئية والصوتية. وكلاهما مثال على الظاهرة الموجية، لكن سلوكهما يبدو مختلفًا جدًا. سيساعدنا فهم سبب اختلافهما في تعليل عدم التفاف الكلاب من كلا جانبي شجرة في ذات الوقت.

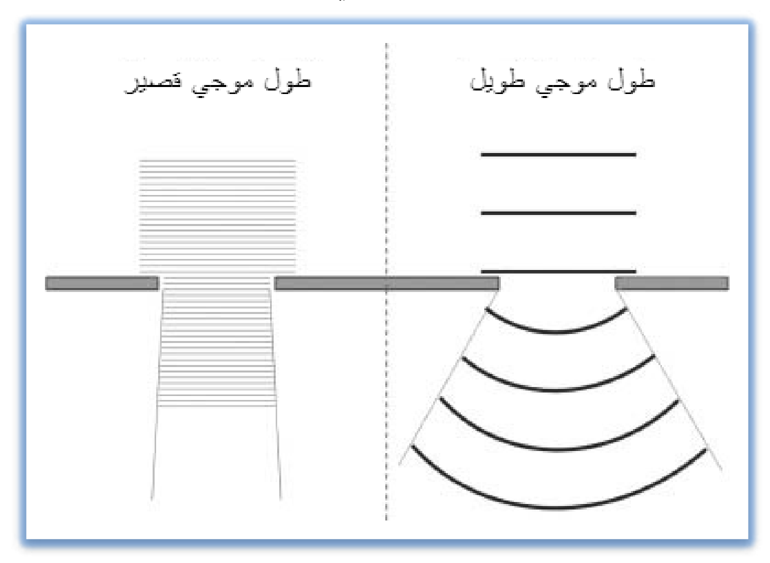
الموجات الصوتية هي موجات انضغاطية في الهواء؛ فنباح كلبة مثلًا يدفع الهواء من فمها (يضغطه) ويسبب اهتزازات تنتقل عبر الهواء في جميع الاتجاهات، وحين تصل إلى كلب آخر، فإنها تسبب اهتزازات في طبلة أذنه، التي تحولها إلى إشارات يفهمها الدماغ -بعد معالجتها- بأنها أصوات. فيبدأ بالنباح بدوره إلى أن يضيق أهل الحي ذرعًا بهما.

الضوء من جهة أخرى نوع آخر من الموجات، إنه مجال كهربائي ومغناطيسي مهتز. ولحسن الحظ فإنه يسافر عبر الفضاء وإن كان خاليًا (بعكس موجات الصوت التي تحتاج إلى وسيط)، لأننا ما كنا لنرى النجوم والمجرات البعيدة لو لم تكن موجات الضوء تسافر عبر «الفضاء الفارغ». وحين تتسلم أعيننا هذه الموجات فإنها تحولها إلى إشارات يفهمها الدماغ بأنها صور لما حولنا.

يتمثل أبرز اختلاف بين موجات الصوت والضوء في حياتنا اليومية بما يحدث حين تصدم كل من الموجتين عائقًا. فموجات الضوء تسافر في خطوط مستقيمة، أما موجات الصوت فتلتف حول العوائق كما يبدو. لهذا السبب تستطيع كلبةٌ سماع صوت اصطدام شريحة بطاطس بأرضية المطبخ وإن كانت لا تراها.

انحناء الموجات الصوتية حول الزوايا هو مثال واضح للحيود، وهو سلوك مميز للموجات التي تصدم العوائق. فحين تصدم موجة عائقًا فيه فتحة، مثل جدار بباب مفتوح، فإنها لن تستمر في مسار مستقيم، بل ستنتشر في مختلف الاتجاهات. وتعتمد سرعة انتشارها على طولها

الموجي وحجم الفتحة التي تمر عبرها. فيكون الانحناء قليلًا جدًا عندما تمر الموجة من فتحة أكبر من طولها الموجي بكثير، وتنتشر كثيرًا عندما تمر من فتحة يقارب بعدها طولها الموجي.



إلى اليمين موجة بطول موجي كبير تمر عبر فتحة مقاربة لطول موجتها، فتحيد في اتجاهات كثيرة. وإلى اليسار موجة بطول موجي صغير تمر عبر فتحة أكبر من طولها الموجي بكثير، فتستمر في مسار مستقيم تقريبًا.

لذا تحيد موجات الصوت عن العوائق التي تصادفها ما دامت لا تكبُر طولها الموجي بكثير (مثل كرسي أو شجرة). ولذات السبب يستلزم حجب نباح كلبة جدارًا كبيرًا، لأن موجات الصوت تنحني حول العوائق الأصغر وتصل إلى الكلاب أو البشر خلفها.

يبلغ طول موجة الصوت في الهواء مترًا تقريبًا، وهذا يقارب بعد العوائق الاعتيادية مثل الأبواب والشبابيك وقطع الأثاث. لهذا السبب، تحيد الموجات الصوتية بنسبة كبيرة تسمح لنا بسماعها من شتى الأماكن.

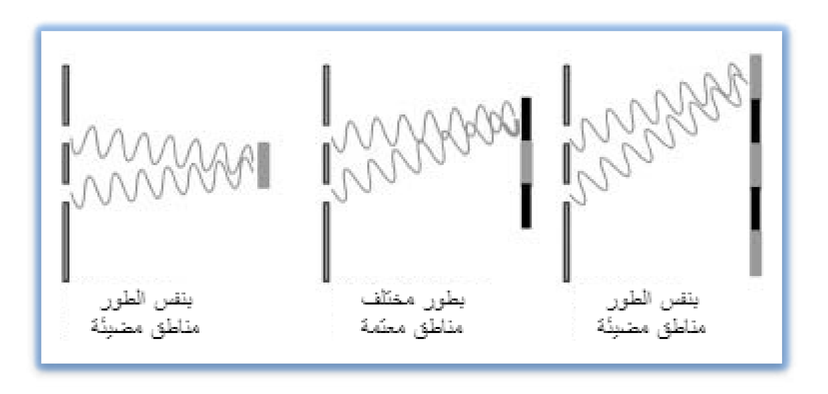
تتفاوت الموجات الصوتية والضوئية فيما يخص طولها. إذ يقل طول موجة الضوء عن جزء من الألف من المليمتر! وهو طول موجي قصير جدًا حتى إن سمك الشعرة يكفي لاحتواء مئة طول موجي من الضوء المرئي. ولأن الضوء لا يكاد يحيد عندما يصدم الأجسام الاعتيادية، تتشكل ظلال للأجسام الصلبة. لكن يحدث حيود يسير حول حافات الأجسام، فتبدو أطراف الظلال مشوشة دائمًا، رغم ذلك يسافر معظم الضوء بخطوط مستقيمة دون حيود واضح.

كيف عرفنا أن الضوء موجة ونحن نعجز عن رؤية حيوده بوضوح؟

تصعب ملاحظة حيود الضوء حول الأجسام الاعتيادية، لأنها أكبر من طول الضوء الموجي بكثير. لكن يسهل تأكيد سلوكه الموجي بالنظر إلى الأجسام الصغيرة بما يكفي.

أجرى الفيزيائي الإنجليزي توماس يونغ تجربة قاطعة أثبتت الطبيعة الموجية للضوء في العام 1799. وذلك بتمرير شعاع من الضوء عبر بطاقة فيها شقين (فتحتين) ضيقين جدًا. وعوضًا عن إيجاد صورة الشقين على الشاشة خلف البطاقة كما يتوقع، فقد رأى نمطًا واضحًا من مناطق مضيئة ومعتمة متتابعة.

إنَّ تجربة شقي يونغ لإثبات قاطع لحيود موجات الضوء وتداخلها. يحيد الضوء المار من أي ثقب من الثقبين في مختلف الاتجاهات، وتتداخل الموجات الخارجة من الثقبين فيما بينها. وفي أي نقطة معلومة، تكون موجات الضوء الخارجة من الثقبين قد قطعت مسافات مختلفة ثم اهتزت اهتزازات مختلفة في العدد. في المناطق المضيئة، تكون موجات الضوء في الطور نفسه فتقوي بعضها لتنتج ضوءًا ألمع من الضوء الخارج من ثقب واحد. أما في المناطق المظلمة فتكون موجات الضوء مختلفة في الطور فتتلف بعضها.



توضيح للحيود حول الشقين: إلى اليسار، تسافر موجات الضوء ذات المسافة من الشقين فتصل إلى الجدار بذات الطور لتكوِّن منطقة مضيئة. في المنتصف تسافر الموجة من الشق السفلي مسافة أطول بنصف طول موجي (مبينة بلون أغمق) فتصل بطور يختلف عن الموجة من الشق العلوي فيتلفان بعضهما ولا تتشكل منطقة مضيئة (تظل معتمة). إلى اليمين تسافر الموجة من الشق السفلي مسافة أطول بطول موجي كامل فتصل إلى الجدار بذات طور الموجة من الشق الآخر لتتكون منطقة مضيئة.

كان الجدل بشأن طبيعة الضوء شديدًا قبل تجربة يونغ. واعتقد بعض الفيزيائيين أن الضوء موجة، واعتقد آخرون (منهم نيوتن) أن الضوء سيل من جسيمات صغيرة. لكن الجميع آمن بموجية الضوء بعد تجربة يونغ - وتجارب لاحقة أجراها العالم الفرنسي أوغستان فرينل- لأن الحيود والتداخل خصائص حصرية للموجات... وظل هذا الاعتقاد سائدًا نحو قرن.

• • •

- ما علاقة هذا بالالتفاف حول الشجرة من الجانبين معًا؟ لست مهتمة بعبور الفتحات، أريد صيد الأرانب!
- ينطبق ذات المبدأ على شعاع الضوء الذي يصدم جسمًا صلبًا صغيرًا. يمكنك عَدُّ الضوء الذي يلتف من يمين العائق والذي يلتف من يساره

بأنه الموجات الخارجة من الفتحتين. إذ تسلك موجاته طرقًا مختلفة للوصول إلى وجهتها، فتصل وهي متفقة في الطور أو مختلفة فيه. وينتج نمط من المناطق المضيئة والمعتمة، كما في تجربة الشقين.

- أظن هذا منطقيًا. إذًا عليَّ إجبار الأرنب على الوقوف في المناطق التي أكون فيها بذات الطور مع نفسي؟

- لا، بسبب ما شرحت لك سابقًا بخصوص طول موجتك. سنعود إلى هذا الأمر لاحقًا لأني يجب أن أتكلم عن الجسيمات أولًا.

- حسنًا. سأكون صبورة. ما دمت لن تستغرق طويلًا.

ميلاد الكم: الضوءُ جسيمًا

أتت أول إشارة إلى وجود مشكلة في النموذج الموجي للضوء من الفيزيائي الألماني ماكس بلانك في العام 1900. وذلك في أثناء دراسته الإشعاع الحراري الذي تصدره جميع الأجسام.

كان يُظن أن تفسير انبعاث الضوء من الأجسام الساخنة أمر سهل، لكون الظاهرة شائعة جدًا (أفضل مثال عليها احمرار قطعة معدن عندما تسخن). لكن انقضى القرن التاسع عشر بهزيمة جميع الفيزيائيين، الذين عجزوا عن تعليل مقدار الضوء مختلف الألوان المنبعث (طيف الضوء).

عَلِمَ بلانك أن للطيف شكلًا محددًا، ينبعث فيه ضوء بكثرة عند الترددات الواطئة وبقلة عند الترددات العالية، وعلم أيضًا أن ذروة الطيف (التردد الذي يكون عنده الضوء المنبعث أسطع ما يمكن) تعتمد على حرارة الجسم حصرًا. حتى إنه اكتشف صيغة رياضية لوصف الشكل المميز للطيف، لكنه وقع في مأزق عندما حاول إيجاد مسوّغ نظري لتلك الصيغة.

كانت الطرائق التي استخدمها تتنبأ بانبعاث ضوء عند الترددات العالية بكمية أكبر بكثير من الضوء الذي كان يصدر في الحقيقة. لذا لجأ -يائسًا- إلى حيلة رياضية توصله إلى النتاجات الواقعية.

تمثلت حيلة بلانك بتخيل أن جميع الأجسام تحتوي على مذبذبات خيالية تشع الضوء بترددات محددة وحسب. وقال إن كمية الطاقة المرتبطة بكل مذبذب تتناسب وتردده، وحسب العلاقة:

الطاقة= ثابت بلانك* التردد

$$E = hf$$

ظنَّ بلانك عندما افترض هذا الافتراض أنه سيوظفه لحل المشكلة وحسب، ثم يستخدم تقنية رياضية للتخلص من المذبذبات الخيالية والثابت. لكن فاجأه أن نتاجاته لن تكون منطقية ما لم يبقِ هذه المذبذبات في النظرية (أي عندما تكون قيمة الثابت صغيرة لكنها لا تساوي صفرًا).

يسمى هذا الثابت اليوم ثابت بلانك تكريمًا له، وقيمته $6.626 * 10^{-34}$ $kg.m^2/s$. أي:

0.0000000000000000000000000000000006626

وهو كما ترى رقم صغير جدًا، لكنه ليس صفرًا.

عدت حيلة بلانك الضوء -الذي ظن الفيزيائيون أنه موجة مستمرة- قِطَعًا منفصلة كالجسيمات. ولا تصدر المذبذبات التي افترضها بلانك الضوء إلا بوحدات ضياء منفصلة. هذا أشبه ببركة ترتفع موجاتها سنتمترًا واحدًا أو اثنين أو ثلاثة، أي بأعداد صحيحة فلا توجد موجة ترتفع سنتمترًا ونصف أو سنتمترين وربع. جلي أن الموجات لا تتصرف بهذه الطريقة، لكن هذا ما تطلبه نموذج بلانك الرياضي.

هذه المذبذبات هي سبب وجود كلمة «الكم» في «الفيزياء الكمية». لأن بلانك سمى مستويات الطاقة بـ«الكمات» (مستخدمًا كلمة لاتينية لذلك)، وهكذا سيحتوي المذبذب عند أي تردد على كم واحد (وحدة طاقة واحدة، hf) أو كمين اثنين، أو ثلاثة إلخ؛ لكنه لن يحتوي على كم ونصف أو اثنين وربع أبدًا. وظلت الكلمة ملاصقة للنظرية التي ابتدأتها حيلة بلانك اليائس.

على الرغم من أن بلانك كثيرًا ما يشاد به لوضعه فكرة كمات الضوء، فإنه لم يؤمن حقًا أن الضوء كمات منفصلة، بل أمل أن تُكتَشَف طريقة ذكية لاشتقاق معادلته دون اللجوء إلى المراوغة.

كان ألبرت آينشتاين أول من تحدث جديًا عن الضوء بصفته جسيمات كمية، وذلك لتفسير التأثير الكهروضوئي في العام 1905. يبدو التأثير الكهروضوئي من التأثيرات الفيزيائية التي يسهل وصفها، فهو: حين تسلط ضوءًا على مادة ما، تتحرر إلكترونات منها.

وهذا أساس عمل حساسات الضوء ومستشعرات الحركة، إذ يحرر الضوء الساقط على الحساس إلكترونًا من المعدن، فيسري في دائرة كهربائية؛ وحين تتغير كمية الضوء الساقطة على الحساس فإن الدائرة ستؤدي وظيفة ما، مثل تشغيل الأضواء وقت الظلام أو فتح باب عندما تمر كلبة من أمام الحساسات المرتبطة به.

يفترض أن يكون تفسير هذه الظاهرة سهلًا، بافتراض الضوء موجةً تَهُزُّ الذرات في اتجاهات مختلفة إلى أن تتحرر الإلكترونات، كما تهز كلبة كيسًا من المقرمشات إلى أن يتمزق وتتناثر في المطبخ. لكن النموذج الموجي قد عجز عن التفسير لسوء الحظ، إذ تنبأ أن طاقة الإلكترونات التي تتحرر من الذرات تعتمد على شدة الضوء (بمعنى أن ارتفاع ضياء الضوء يزيد قوة الهز، فيزيد سرعة تناثر القِطَع).

أفادت التجارب -خلافًا للمتوقع- أن طاقة الإلكترونات لا تعتمد على الشدة بتاتًا، بل تعتمد على التردد (الذي يفترض أنه ليس مهمًا في النموذج الموجي). فقد ثبت أنك لن تحرر أي إلكترون ما دام التردد واطئًا، مهما زادت قوة الهز (شدة الضوء عالية)؛ وأنك ستحرر إلكترونات ذات طاقة محسوسة ما دام التردد عاليًا، وإن كان الهز ضعيفًا (شدة الضوء واطئة).

• • •

- الفيزيائيون سخفاء.
- عذرًا؟
- إن أمسكتَ كيسًا مليئًا بالمقرمشات، عليك هزه بأسرع ما يمكن، وأقوى ما يمكن. هكذا تنال المقرمشات التي فيه. أي كلب يعلم ذلك!

- ماذا عساي أقول، للكلاب فهم بديهي ممتاز للنظرية الكمية.
- شكرًا.
- بالطبع فإن هدف الفيزياء هو معرفة لماذا تتحرر المقرمشات.
- ربما في نظرك. نحن نريد الحصول عليها وحسب.

• • •

فسر آينشتاين التأثير الكهروضوئي بتطبيق معادلة بلانك على الضوء نفسه. لقد وصف شعاع الضوء بأنه سيل من الجسيمات الصغيرة، تساوي طاقة كل منها ثابت بلانك مضروبًا بتردد موجة الضوء، وهي ذات المعادلة المستخدمة في مذبذبات بلانك (E=hf). يحمل كل من هذه الفوتونات (اسم تلك الجسيمات الصغيرة حاليًا) طاقة محددة تعتمد على التردد، ويحتاج الإلكترون -في المعدن الذي تصدمه الفوتونات- إلى كمية دنيا من الطاقة ليتحرر.

إن كان الفوتون بطاقة أكبر من الطاقة الدنيا اللازمة لتحرير الإلكترون، سيتحرر الإلكترون حاملًا باقي طاقة الفوتون. أي كلما زاد تردد الضوء زادت طاقة الفوتون وزادت الطاقة التي يحملها الإلكترون المتحرر. وإن كانت طاقة الفوتون أدنى من الطاقة الدنيا اللازمة لتحرير الإلكترون، فلن يحدث شيء؛ وهذا يفسر شحة الإلكترونات المتحررة عند تعرض الأجسام لضوء منخفض التردد[3]. طابقت التجارب التي أجريت هذه النظرية تمامًا.

[3] قد تتساءل إن كان يمكنك استخدام فوتونين منخفضي التردد لتحرير إلكترون. اعلم أن هذا يتطلب أن يصدم الفوتونان ذات الإلكترون في ذات اللحظة، وهذا لا يكاد يصدف.

كان وصف الضوء على أنه جسيم فكرة شديدة الجدلية في العام 1905، لأنها نسفت فيزياء مئة عام، وألزمت تفكيرًا مختلفًا فيه. لقد تطلبت عد الضوء سيلًا من الجسيمات المنفصلة (كالحبيبات التي تصب في وعاء كلبة) عوضًا عن عده موجة مستمرة (كالماء الذي يصب في ذات الوعاء). وأنبأت أيضًا أن هذه الجسيمات ما زالت ذات تردد، وأنها تظهر نمط تداخل عند جمعها، كما لو أنها موجة.

استغرق نموذج آينشتاين فترة ليحظى بالقبول، ووجد العلماء الفكرة مقلقة جدًا في وقتها. مثلًا فقد كره الفيزيائي الأمريكي روبرت ميليكان فكرة آينشتاين، وأجرى في العام 1916 سلسلة تجارب بالغة الدقة عن التأثير الكهروضوئي بأمل إيجاد دليل على خطأ آينشتاين[4]. فما وجد من نتاجات تجربته غير مزيد من البراهين التي تدعمها وتؤكد صحتها.

لكن حتى هذا لم يكن هذا كافيًا لقبول فكرة الفوتونات. فلم تحظَ الفكرة بقبول واسع حتى العام 1923، حين أجرى آرثر هولي كومبتون سلسلة تجارب شهيرة باستخدام الأشعة السينية، أثبتت بنحو لا لبس فيه أن الضوء يسلك سلوك الجسيمات. إذ أثبت أن للضوء زخمًا، وأن هذا الزخم ينتقل للجسيمات الأخرى عند التصادم.

إن دمجت معادلة بلانك للفوتون المفرد ومعادلات النسبية الخاصة لآينشتاين، سوف تستخلص أن للفوتون زخمًا صغيرًا يعطى بالمعادلة:

زخم الفوتون= ثابت بلانك÷ الطول الموجي للضوء

$$p = h/\lambda$$

[4] اعتقد ميليكان أن نموذج آينشتاين يفتقر «لأي أساس نظري مرضٍ» ووصف نجاحه بأنه «تجريبي بحت»؛ وهذا بشع جدًا بالمعايير الفيزيائية. المفارقة أن هذين الاقتباسين هما من أول صفحة من ورقته العلمية التي برهنت تنبؤات نظرية آينشتاين.

- ألم تقل إن هذا الكتاب لن يكون فيه شيء عن النسبية؟
- بل قلت إن النسبية ليست موضوع كتابنا، الأمران مختلفان. بعض مفاهيم النسبية مهمة للفيزياء الكمية.
- ما علاقة النسبية بهذا على أي حال؟
- النسبية تشترط أن يكون للفوتون زخم، لأن له طاقة؛ حتى إن لم تكن له كتلة.
- إذًا الأمر متعلق بـ $E=mc^2$؟
- ليس تمامًا، لكنه مشابه. للفوتون زخم لأن له طاقة، بذات الطريقة التي تكون فيها للأجسام طاقة لأن لها كتلة. ولمسة لطيفة منكِ أن تتحدثي بالمعادلات.
- لا داعي للإشادة. حتى أتفه الكلاب تعرف أن الطاقة تساوي الكتلة ضرب مربع سرعة الضوء. وأنا كلبة استثنائية.

• • •

يتضح من المعادلة أن العلاقة عكسية بين الزخم والطول الموجي للفوتون، أي كلما زادت قيمة أحدهما قلت قيمة الآخر. هذا يعني أن تصادم فوتون الضوء بجسم ساكن يجب أن يشبه التصادم بين جسيمين، فيكتسب الجسم الساكن بعض الزخم والطاقة، ويفقد الفوتون المتحرك بعض الزخم والطاقة. لكننا لا نلاحظ هذا لأن زخم الفوتون صغير جدًا (لصغر ثابت بلانك الموجود في المعادلة)، رغم ذلك نستطيع رصد التغير في الزخم إن راقبنا التصادم بين جسيم صغير الكتلة مثل الإلكترون وفوتون بطول موجي قصير جدًا (الذي يكون له زخم كبير، ولك مراجعة المعادلة في الصفحة السابقة).

في العام 1923، أجرى كومبتون تجربة عن ارتداد أشعة سينية طولها الموجي 0.0709 نانومتر[5] عن هدف صلب (الأشعة السينية هي مجرد ضوء طوله الموجي قصير جدًا، علمًا أن الطول الموجي للضوء المرئي هو نحو 500 نانومتر).

حين قاس كومبتون الأشعة المتبعثرة عن الهدف وجد أن طولها الموجي قد زاد! (مثلًا فقد كان الطول الموجي للأشعة المنعكسة بزاوية 90° عن محورها يساوي 0.0733 نانومتر)، وهذا يشير إلى أنها فقدت شيئًا من زخمها. خسارة الزخم هذه هي تمامًا ما يجب حدوثه إن كانت أشعة الضوء جسيمات، فعندما يصدم فوتون أشعة سينية إلكترونًا أكثر سكونًا منه فإنه يفقد بعضًا من زخمه، الذي ينتقل إلى الإلكترون فتزيد سرعته. أي يكون للفوتون زخم أقل بعد التصادم، نتيجة لذلك طول موجي أكبر، وهذا ما لاحظه كومبتون تمامًا.

يعتمد الزخم المفقود على الزاوية التي يصدم بها الفوتون الإلكترون، فلا يفقد الفوتون الذي يصدم الإلكترون جزئيًا الكثير من زخمه، ويفقد الذي يصادم «وجهًا لوجه» وينعكس الكثير من الزخم. قاس كومبتون الطول الموجي من مختلف الزوايا، وطابقت نتاجاته التنبؤات النظرية تمامًا، مؤكدةً أن التغير في الطول الموجي للفوتون كان بسبب التصادم مع الإلكترون، وليس لتأثير سواه.

نال آينشتاين وميليكان وكومبتون جميعًا جائزة نوبل لإثباتهم الطبيعة الجسيمية للضوء. كانت تجارب ميليكان عن التأثير الكهروضوئي وتجارب كومبتون عن تبعثر الأشعة كفيلة بإقناع معظم الفيزيائيين بكون الضوء سيل من الجسيمات. لكن ظل بعض الفيزيائيين المتعنتين يرفض فكرة الفوتونات لأن حتى تأثير كومبتون يمكن تفسيره بدونها، مع أن الطريقة معقدة جدًا.

---

[5] يساوي النانومتر جزءًا من مليار من المتر، أي 10^{-9} متر.

انتهت آخر معارضة للفكرة في عام 1977 حين وجد برهان بيّن على وجود الفوتونات في تجربة أجراها كيمبل وماندبل وداغينيه، تمثلت بمراقبة الضوء المنبعث من ذرة مفردة.

تخبرك فجوة الـ72 سنة بين طرح آينشتاين لنظريته وقبولها الأخير شيئًا عن عناد الفيزيائيين الذين يواجهون فكرة جديدة. يمكن أن يكون فصل فيزيائي عن نموذج عزيز بصعوبة فصل كلبة عن عظمة جيدة.

ومع غرابة اكتشاف أن الضوء يتكون من جسيمات، فما تلاه كان أغرب...

الإلكترونات المتداخلة: الجسيمُ موجةً

في العام 1923 ذاته، اقترح طالب الدكتوراه لويس فيكتور بيير ريموند دي بروغلي[6] اقتراحًا متطرفًا؛ فصرح بوجوب وجود تناظر بين الضوء والمادة، وعليه امتلاك الجسيمات المادية -مثل الإلكترون- طولًا موجيًا. فما المانع أن تسلك الجسيمات سلوكًا موجيًا ما دامت الموجات نفسها تتصرف كالجسيمات؟

افترض دي بروغلي رياضيًا أن كما للفوتون زخم يتناسب وطول موجته، فإن للأجسام المادية -مثل الإلكترون- طول موجي يتناسب وزخمها. كالتالي:

الطول الموجي= ثابت بلانك÷ الزخم

$$\lambda = h/p$$

وهي ذات المعادلة التي تصف زخم الفوتون (الصفحة 34) لكنها معكوسة. كان للفكرة أناقة رياضية راقت لعلماء الفيزياء النظرية في ذلك الوقت، لكنها أيضًا بدت أشبه بلغوٍ فارغ؛ لأن الأجسام الصلبة لا تظهر تلميحات إلى سلوك موجي.

لم يعلم أحد ما يفعل في مواجهة ما طرحه دي بروغلي في رسالته في الدكتوراه، حتى إن أساتذته لم يعلموا إن كان عليهم منحه النجاح من عدمه واستعاذوا بآينشتاين منها طالبين مشورته. شهد ألبرت لها بالعبقرية ونال دي بروغلي الشهادة العليا، لكن لم تحظَ فكرته بشأن تصرف الإلكترونات موجيًا بدعم كبير إلا في آخر ذلك العقد، حين أثبتتها تجربتان.

[6] ينبئك اسم دي بروغلي بشيء عن خلفيته الأرستقراطية، فهو الدوق دي بروغلي السابع. تسبب طريقة اللفظ الصحيحة لكنيته حيرة كبيرة للفيزيائيين -وسواهم- فقد سمعتهم يلفظونها دي بروغلي ودي بروغلي ودي بروي لي وغيرها. يبدو النطق الفرنسي الأصح أقرب لـ«دي-بغوي».

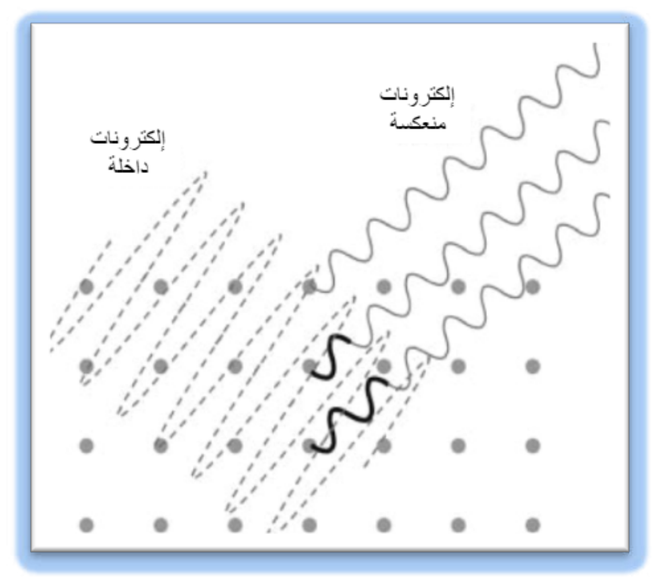
في العام 1927، كان العالمان الأمريكيان كلنتون دافيسون ولستر جيرمر يراقبان ارتداد الإلكترونات عن معدن النيكل، ويسجلان عدد الإلكترونات المرتدة في مختلف الزوايا. لكنهما تفاجئا بالتقاط راصدهما عددًا كبيرًا من الإلكترونات في زاوية معينة.

فُسِّرت هذه النتيجة لاحقًا بأنها حيود موجي للإلكترونات المرتدة عن صفوف مختلفة من ذرات النيكل، وتفصيل ما حدث في التجربة التالي: اخترق شعاع الإلكترونات بلورة[7] النيكل، فانعكس بعض الإلكترونات عن الصف الأول من الذرات في البلورة، واستمر المتبقي منها في الاختراق فانعكس جزء آخر منها عن الذرات في الصف الثاني، واستمر المتبقي... وهكذا.

تصرفت جميع الإلكترونات المرتدة عن هذه الصفوف كموجات. ولأن الموجات التي ارتدت عن الصفوف الأعمق في البلورة (مثل الثالث) قد قطعت مسافة أطول من تلك التي ارتدت عن الصفوف الأقرب للسطح (مثل الأول)، فإنها تداخلت فيما بينها كما يتداخل الضوء ونفسه في تجربة الشق المزدوج ليونغ (الفرق هنا أن الشقوق كثيرة، لا شقين وحسب). كانت معظم الإلكترونات المتداخلة مختلفة في الطور فألغت بعضها. لكن في بعض الزوايا، كانت المسافة الإضافية التي قطعتها الإلكترونات مساوية لطولها الموجي (أو مضاعفاته)، فأصبحت في ذات الطور وأنتجت مناطقًا مضيئة رصدها دافيسون وجيرمر بصورة أعداد كبيرة من الإلكترونات المرتدة في تلك الزاوية.

[7] تشير البلورات فيزيائيًا إلى أي جسم صلب ذراته منتظمة ومتسقة. وهذا يشمل تلك الأشياء الصافية اللماعة التي أخذنا منها التسمية، رغم أن التسمية يمكن أن تشير إلى المعادن والمواد الأخرى.

لقد تنبأت معادلة دي برولي -التي تنص على وجود طول موجي للإلكترون- بالنتاجات السابقة أحسن تنبؤ[8].



حيود الإلكترونات عن بلورة نيكل: يمر شعاع إلكترونات (الخط المتقطع) إلى بلورة ذرات منتظمة، ويرتد جزء من الموجة (إلكترونات مفردة) عن مختلف الذرات في البلورة. تسافر الإلكترونات المرتدة عن أماكن أعمق في البلورة مسافة أطول للخروج (باللون الداكن)؛ لكن في بعض الزوايا، تساوي هذه المسافة مضاعفات صحيحة للطول الموجي، لذا فإن الموجات الخارجة من البلورة تكون متفقة في الطور وتشكل المناطق المضيئة التي رصدها دافيسون وجيرمر.

---

(8) المفارقة أن دافيسون وجيرمر لم ينجحا إلا لأنهما خربا قطعة من أجهزتهما. إذ لم يلحظا عندما أجريا التجربة أول مرة أي حيود، لكون النيكل يتألف من العديد من البلورات الصغيرة التي تنتج أنماط تداخل مختلفة، فتندمج المناطق المضيئة الخارجة عن كل منها وتتشوش. ثم تسببا بدخول بعض الهواء إلى نظامهما المفرغ عن غير عمد. وأذابا النيكل المستهدف في محاولة تصليح الخطأ، ما سبب إعادة تبلوره إلى بلورة واحدة كبيرة تنتج نمط حيود واحد واضح. في بعض الأحيان، يكون خراب جهاز مهم أفضل ما قد يحدث لفيزيائي.

- مهلًا، أنى لهذا أن ينجح! ألا يفترض أن توجد الكثير من المناطق المضيئة، لوجود الكثير من الثقوب؟
- كلا. فالنمط الذي ينتج من جمع الموجات هو ذاته نمط المناطق المضيئة والمظلمة؛ لكن إن استخدمت المزيد من الثقوب فإن المناطق المضيئة تزداد ضياءً وضيقًا، والمناطق المظلمة تزداد ظلمة وعرضًا.
- أيعني هذا أني سأصبح أضيق وأنور إن مررت عبر سياج حديقة الجيران؟
- ستكونين أضيق نعم، لكنها ليست بالفكرة النيرة. المهم هنا أن «الثقوب» التي استخدمها دافيسون وجيرمر كانت متقاربة جدًا فيستطيعان رؤية منطقة مضيئة واحدة في المكان الذي يضعان فيه الراصد. وإن استبدلا البلورة أو زادا سرعة الإلكترونات فإنهما كانا ليرصدا مناطق أكثر.

• • •

في وقت مقارب، أجرى جورج باغيت طومسون من جامعة أبردين سلسلة تجارب أطلق فيها أشعة إلكترونات على صفيحة معدن رقيقة، وتابع نمط الحيود في الإلكترونات المنطلقة. فوجد نمطًا يشابه في جوهره النمط الذي رصده دافيسون وجيرمر.

يمثل نمط الحيود الذي رصده هؤلاء الثلاثة دليلًا قاطعًا على السلوك الموجي، كالذي أثبته يونغ في العام 1799؛ وهكذا برهنت تجاربهم أن دي برولي كان مصيبًا، وأن للإلكترونات طبيعة موجية.

نال دي برولي جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1929 لتنبؤه بموجية الإلكترون، وتشارك دافيسون وطومسون جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1937 لإثباتهم تنبؤ دي برولي[9].

---

[9] الطريف أن والد جورج طومسون -وهو جوزيف طومسون من جامعة كامبردج- ربح جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1906 لإثباته الطبيعة الجسيمية للإلكترون. يحتمل أن هذا أدى إلى محاورات مشوقة حول مائدة طعام آل طومسون.

أثبت العلماء لاحقًا أن جميع الأجسام دون الذرية تتصرف كموجات، فشعاع من البروتونات أو النيوترونات سيحيد عن عيِّنة ذرات بذات الطريقة التي يحيد بها الإلكترون. بل إن حيود النيوترون هو التقنية النموذجية المستخدمة حاليًا لتحديد بنية المواد في المستوى الذري، إذ يستنتج العلماء طريقة تراصف ذرات المادة من دراسة نمط تداخل النيوترونات المرتدة عنها.

تتيح معرفة هياكل المواد في المستوى الذري لعلماء المواد القدرة على تصميم مواد أقوى وأخف لتستخدم في السيارات والطائرات والمسابير الفضائية. هذا ويمكن لحيود النيوترونات أن يستخدم لتحديد بنية المواد الأحيائية مثل البروتينات والإنزيمات، فيوفر معلومات مهمة جدًا للعلماء الباحثين عن عقاقير وعلاجات طبية جديدة.

كل شيء مؤلف من موجات: تداخل الجزيئات

عود على بدء؛ إن كانت جميع الأشياء مؤلفة من جسيمات ذات خصائص موجية، فلمَ لا نرى الكلاب تحيد حول الأشجار؟ وإن كان شعاع إلكترونات يحيد عن صفين من الذرات، فلم لا نرى كلبةً تركض من كلا جانبي الشجرة في ذات الوقت لتحاصر أرنبًا خلفها؟

علَّة ذلك هي الطول الموجي. فكما في موجات الضوء والصوت التي ناقشناها سابقًا، يتمثل سبب الاختلاف الشاسع بين سلوك الكلاب والإلكترونات التي تصادف عوائقًا بالاختلاف في أطوالهما الموجية. لأنه يحدد حسب الزخم، وللكلاب زخم يفوق زخم الإلكترونات بكثير.

يحسب طول موجة جسيم مادي من تقسيم ثابت بلانك على زخم الجسيم، الذي ليس بأكثر من كتلته مضروبة بسرعته. ثابت بلانك صغير جدًا، لكن كذلك هي كتلة الإلكترون (نحو 10^{-30} كغم). كانت الإلكترونات في تجربة دافيسون وجيرمر بطول موجي يساوي قرابة عُشرَ نانومتر (0.0000000001 متر) رغم حركتها بسرعة عالية جدًا تقارب ستة ملايين متر في الثانية. هذا الطول صغير جدًا، لكنه يساوي نصف المسافة تقريبًا بين ذرتين من النيكل؛ لذا فهو مناسب لرؤية الحيود (كما تحيد موجات الصوت التي طولها الموجي نصف متر من باب عرضه متر واحد بيسر).

من جهة أخرى، يقارب الطول الموجي لكلبة تزن 20 كيلوغرامًا تتمشى في نزهة نحو 10^{-35} متر[(10)]. هذا أقل من الطول الموجي للإلكترونات في تجربة دافيسون وجيرمر بمليون مليار مليار مرة.

---

(10) 0.00000000000000000000000000000000001 متر.

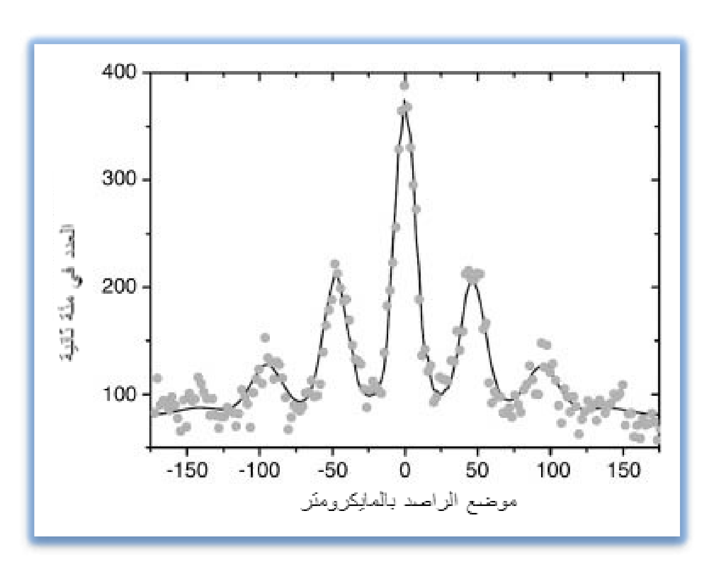
إن كنت تسأل: ما النسبة بين هذا الطول الموجي مقارنة بشجرة؟ فاعلم أن الفرق بين الطول الموجي للكلبة مقارنة بالمسافة بين ذرتين، يشبه الفرق بين المسافة بين ذرتين مقارنة بقطر المجموعة الشمسية. لذا يستحيل رؤية حيود موجة كلبة حول بلورة نيكل، فما بالك بمرورها من كلا جانبي الشجرة في ذات الوقت.

إذًا، ما هو أكبر جسم مادي رصدت طبيعته الموجية؟

أجرى فريق من جامعة فيينا يقوده الدكتور أنطون تسايلينغر تجربة في العام 1999 رصدوا عبرها حيود وتداخل جزيئات تتكون من 60 ذرة كربون مترابطة بشكل أشبه بكرة قدم صغيرة. تزيد كتلة كل من هذه الكرات عن كتلة الإلكترون بمليون مرة.

أطلق الفريق هذه الجزيئات التي تشبه الكرات على راصد، وحين نظروا إلى توزيعها النهائي وجدوه عبارة عن شعاع واحد نحيل (سلكت سلوكًا جسيميًا ولم تظهر تداخلًا). لكنهم عندما أطلقوا ذات الجزيئات عبر رقاقة سيليكون بها ثقوب صغيرة جدًا ونظروا إلى توزيعها على الجانب الآخر؛ وجدوا أن ذروة الشعاع النحيلة أصبحت أعرض، مع «كتل» منفصلة إلى الجانبين! تمثل هذه الكتل دليلًا قاطعًا على السلوك الموجي، كما هو الحال في المناطق المضيئة والمظلمة في تجربة يونغ، أو قمم حيود الإلكترون في تجربة دافيسون وجيرمر. أي إن الجزيئات التي مرت عبر الثقوب انتشرت وتداخلت مع بعضها، كما تفعل موجات الضوء.

أثبت فريق تسايلينغر حيود جزيئات أكبر في تجارب لاحقة. وذلك بإضافة 48 ذرة فلور إلى كل من جزيئاتهم الأصلية المكونة من 60 ذرة كربون. كان للجسيمات النهائية وزن أكبر من وزن الإلكترون بثلاثة ملايين مرة، وهي حاليًا أثقل جسم رصدت طبيعته الموجية مباشرة.



نمط التداخل الحاصل بسبب مرور شعاع من الجزيئات عبر مصفوفة من الثقوب الضيقة. الكتل الإضافية إلى جانبي القمة المركزية هي نتاج حيود وتداخل الجزيئات المارة عبر الثقوب.

يقل الطول الموجي للجسيم بزيادة كتلته، فتصعب رؤية التأثير الموجي مباشرة. ولهذا السبب لم يرَ أحد كلبةً تحيد حول شجرة قط، وليس من المرجح أن نرى هكذا شيء قريبًا. رغم ذلك فليست الكلبة فيزيائيًا غير مجموعة من الجزيئات الأحيائية، والتي أثبت فريق تسايلينغر امتلاكها خصائص موجية. لذا يمكننا الجزم أن للكلاب طبيعة موجية، وكذلك كل شيء آخر.

• • •

- إذًا، أي الأشياء هي في الواقع؟

- ماذا تعنين؟

- هل الإلكترونات جسيمات تتصرف كموجات؟ أو هل الفوتونات موجات تتصرف كجسيمات؟

- أنتِ تسألين الأسئلة الخطأ، أو تجيبين الإجابات الخطأ. ليس الواقع شيئًا مما قلتِ، بل إن الإلكترون والفوتون كلاهما أمثلة لنوعٍ ثالث من الأشياء، نوعٍ ليس بالجسيم ولا الموجة، بل فيه خصائص من كليهما.

- إذًا، هي مثل السرنب؟

- «سرنب»؟

- كائن جزء منه سنجاب وجزء منه أرنب. سرنب!

- أفضل تسميتها «جسيمات كمية»، لكن افترض أن الفكرة نفسها. يتألف كل ما في الكون من هذه الجسيمات الكمية.

- الأمر شديد الغرابة.

- ما هذا إلا بداية الغرائب...

الفصل الثاني

أين عظمتي؟ مبدأ الريبة لهايزنبيرغ

دخلت عليَّ إيمي وأنا على الأريكة أصحح أوراق الامتحان، بدت مهمومة، فسألتها: ما بك؟

- لقد أضعت عظمتي، ألا تعلم أين عظمتي؟

- ليس لدي علم بموقع عظمتك، لكني أعلم سرعة حركتها بالضبط.

ران الصمت على المكان. نظرت إليها لأجدها تحدق إليَّ بذهول، فأسهبت:

إنها طرفة فيزيائية. ألم تسمعي بمبدأ الريبة لهايزنبيرغ؟ ذاك الذي ينص على إن الريبة في موضع الجسم مضروبة بالريبة في زخمه دائمًا أكبر من ثابت بلانك المقسوم على أربعة أَضعاف النسبة الثابتة؟ ما يعني أن زيادة الريبة في قيمة أحد المتغيرين (الموقع) تلزم انخفاض الريبة في قيمة المتغير الآخر (الزخم، الذي يساوي السرعة ضرب الكتلة).

باتت ترمقني بنظرات غضب، وقالت كأنها تهدد: توقف عن فعل هذا!

- ماذا؟ حتى إن لم يكن مضحكًا جدًا، لكنه ليس بذلك السوء.

- الذنب ذنبك أني أعجز عن إيجاد عظمتي.

- كيف الذنب ذنبي؟

- لأنك قست السرعة التي تتحرك بها، فزادت الريبة في موضعها. والآن أنا أعجز عن إيجاد عظمتي.

- ليس هذا ما حدث. ليست هذه آلية مبدأ الريبة.

- بل هي كذلك. لقد قلتها توًا. أنت تعرف سرعة حركة عظمتي، لذا لا أستطيع إيجادها.

- كانت تلك مجرد مزحة. لم أقس سرعة حركتها فعلًا. ثم إن هذا فهم مغلوط لمبدأ الريبة؛ فليس مجرد القياس ما يغير حالة النظام، بل إن ما نستطيع قياسه محدود بحقيقة أن الموضع والزخم هي كميات غير محددة إلى أن نقيسها.
قالت والحيرة بادية عليها: لا أرى فرقًا.
- سأوضح لكِ: عندما تنسبين كل شيء لتأثير القياس فأنتِ تفترضين أن للشيء الذي تقيسينه خصائص محددة ومعرفة جيدًا، والريبة في تلك الخصائص إنما تنبع من الاضطراب الذي تسببه عملية القياس نفسها. هذا ليس ما يحدث في النظرية الكمية، إذ ليس هناك قيم مطلقة لهذه الكميات؛ والريبة فيها ليست لعيب في عملية القياس التي تجرينها، بل لكون تلك الكميات غير محددة أساسًا، ولا يمكن أن تكون محددة بسبب الطبيعة الكمية للواقع.
- صبغت ملامح الحكمة محياها للحظة، لكنها عادت لرمقي بغضب وقالت: أتعلم ماذا، أظنك أضعت عظمتي وتحاول التملص من الأمر بهذا الكلام المحير.
- لا. صدقًا فإن هذه هي النظرية. بالإضافة إلى ذلك، حتى إن غيّرت موضع عظمتك بقياسي لسرعتها، فمن المستحيل أن يمنعك ذلك من إيجادها.
- حقًا؟ كيف ذلك؟
- لأن الريبة التي تسببت بها ستكون صغيرة جدًا. فلما كانت عظمتك تزن مئات الغرامات، لن يسبب قياس سرعتها -وإن كان بدقة تبلغ ملمترًا في الثانية- ريبة في موضعها إلا بقيمة صغيرة تقارب 10^{-31} من المتر. هذا أصغر من قطر البروتون بتريليون مرة، أي إنك لن تلاحظي الفرق أصلًا.
- حقًا؟ إذًا أين عظمتي يا فلتة زمانك؟
- لا أعلم. هل بحثتِ عنها تحت طاولة التلفاز؟ أحيانًا تركل هناك بالخطأ.

هروَلَت إلى طاولة التلفاز وألصقت أنفها تحتها بحثًا عن العظمة وقالت «ها هي ذي عظمتي!». ومدت مخالبها لتخرجها من هناك، وحين نجحت أخيرًا، أعلنت بفخر «لدي عظمة!» ونست مبدأ الريبة وبدأت بمضغ العظمة بصخب.

• • •

من المرجح أن مبدأ الريبة لهايزنبيرغ هو ثاني أشهر مبادئ الفيزياء الحديثة، بعد معادلة آينشتاين $E=mc^2$ التي تمثل أبرز نتاجات النسبية. ورغم أن معظم الناس لن يتعرفوا على الدالة الموجية إن صادفوها في إحدى المقالات، فإن أكثرهم قد سمع بمبدأ الريبة (أو عدم الدقة أو اللايقين) الذي ينص على: يستحيل معرفة موضع وزخم الجسيم بدقة في ذات الوقت؛ فكلما زاد اليقين (قلت الريبة) في دقة قياس القيمة الأولى، زاد عدم اليقين (زادت الريبة) في دقة قياس الأخرى. أي إن قياس الموضع بدقة يقلل دقة قياس الزخم بالضرورة، والعكس صحيح.

سنتعرف في هذا الفصل على مبدأ الريبة، وكيف سُنَّ بسبب ازدواجية جسيم-موجة التي ناقشناها في الفصل السابق. عادة ما يستعرض مبدأ الريبة كتصريح على أن قياس نظام ما يغير من حالة ذلك النظام، وتظهر هكذا إشارات للمبدأ في مختلف المجالات سواء السياسية أو الرياضية أو الفلكلورية[1]. مع أنه لا يتعلق بتفاصيل عملية القياس في جوهره! فهو حد أساسي لما يمكن أن نعرفه، وسببه امتلاك الأجسام الكمية كلا الخصائص الموجية والجسيمية.

---

[1] لأقرب لك اتساع المواضيع التي تظهر فيها هذه الأشياء: أظهر محرك بحث غوغل في العام 2008 ذكرًا لمبدأ الريبة لهايزنبيرغ في مقال لمنظمة فيرمونت فري برس الإخبارية عن آلات التصوير التي تستخدم في مراقبة السرعة، ومقال في صحيفة تورونتو ستار يشير إلى تأثير اليوتيوب في «فناني تحت الأرض»، ومقال مدوَّنة عن فريق فينيكس صنز الأمريكي لكرة السلة. بالمناسبة، جميع تلك المواقع تستخدم مبدأ الريبة بصورة خاطئة. وآمل أن تفهمه أكثر منهم في نهاية هذا الفصل.

مبدأ الريبة هو حيث تصادمت الفيزياء الكمية والفلسفة أول مرة. وتعارض فكرته من وجود حدود إلزامية لعمليات القياس أسس الفيزياء الكلاسيكية وأهدافها. تفرض الريبة الكمية إعادة نظر كاملة في أسس الفيزياء، وتؤدي على نحو مباشر إلى مشاكل القياس والتفسير التي سنستعرضها في الفصلين الثالث والرابع.

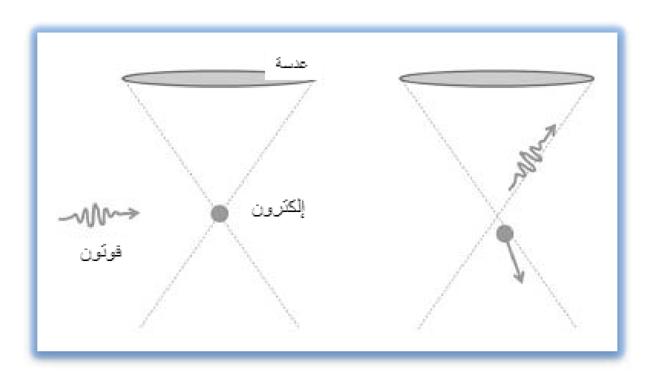
مجهر هايزنبيرغ: الحجج النصف كلاسيكية

يستند الوصف التقليدي للريبة من أن فعل القياس يغير حالة النظام (وهو غير دقيق) إلى الفيزياء الكلاسيكية أصالةً، فقد طور في عشرينيات وثلاثينيات القرن الماضي لإقناع الفيزيائيين الكلاسيكيين بلزوم أخذ الريبة الكمية بالحسبان.

يندرج هذا الوصف ضمن ما يسميه الفيزيائيون حججًا نصف كلاسيكية، وهي الحجج المعتمدة على الفيزياء الكلاسيكية المطعمة بأفكار حديثة. وهي تتميز بكونها سهلة الفهم، مع أنها تقصر عن وصف الحقيقة كلها.

سيألف أي كلب الهدف من استعراض مبدأ الريبة بطريقة نصف كلاسيكية. تخيل وجود أرنب في الحديقة تريد معرفة مكانه وسرعته بدقة. سوف تتسبب عندما تحاول قياس موقعه بدقة أفضل (عبر الاقتراب منه) بتغيير سرعته، لأنه سيهرب. ومهما حاولت التسلل والاقتراب ببطء، فإنك ستجعله يهرب عاجلًا أو آجلًا، وتظل بلا معرفة دقيقة بسرعته وموقعه.

يعجز الإلكترون عن الهرب من تلقاء نفسه بالطبع، لأنه ليس واعيًا كما الأرنب، لكن عملية مشابهة تحدث: تتطلب عملية قياس موقع إلكترون طريقة تتيح لنا رؤيته، مثل صدمه بفوتون ورؤية الضوء المتشتت عبر المجهر. المشكلة في أن للفوتون زخمًا كما استعرضنا في الفصل الأول، لذا سيغير زخم الإلكترون عندما يصدمه ويرتد عنه. ستكون قيمة زخم الإلكترون بعد التصادم غير دقيقة (ذات ريبة)، لأن عدسة المجهر تلتقط الفوتونات من زوايا مختلفة فلا يمكن معرفة الاتجاه الذي سلكه.



ارتداد فوتون عن إلكترونٍ «ساكن»، ورؤيته عبر عدسة مجهرية لقياس موضع الإلكترون. المشكلة في أن الإلكترون يكتسب بعض الزخم من التصادم، ما يؤدي إلى زيادة الريبة في زخمه.

يمكنك تقليل التغير في الزخم (تقليل الريبة) بزيادة طول الضوء الموجي (أي تقليل زخم الفوتون الذي ينتقل للإلكترون)، لكنك ستقلل بذلك دقة المجهر، وتفقد معلومات عن موضع الإلكترون[2]. وإن أردت زيادة الدقة في قياس الموضع، عليك تقليل الطول الموجي للضوء المستخدم (الفوتونات)، وهذا يعني استخدام ضوء بزخم شديد يتسبب بتغير كبير في زخم الإلكترون. النتيجة أنك لا تستطيع تحديد موضع الإلكترون بدقة دون التضحية بمعلومات عن زخمه، والعكس صحيح.

اِعلَم أن المعنى الحقيقي لمبدأ الريبة أعمق من فحوى هذه الحجة النصف كلاسيكية. لأنها تصور الإلكترون كأن له موقعًا وسرعة محددتين قبل محاولتك قياسه، وله موقع وسرعة محددتين بعد أن أجريت عملية القياس؛ أي إن لهذه الخصائص قيمًا محددة لكنك لا تعرفها وحسب. وهذا ليس صحيحًا، لأنها غير محددة في ميكانيك الكم.

---

[2] لهذا السبب يستخدم العلماء المجهر الإلكتروني للنظر إلى الأشياء الصغيرة جدًا، فهو يستخدم الإلكترونات ذات الطول الموجي القصير جدًا مقارنة بالضوء المرئي.

الريبة ليست تصريحًا بمحدودية القياس، بل جَهرٌ بمحدودية الواقع. فلا يعني السؤال عن موقع وزخم الجسيم شيئًا، لأن هذه الكميات غير موجودة أصلًا.

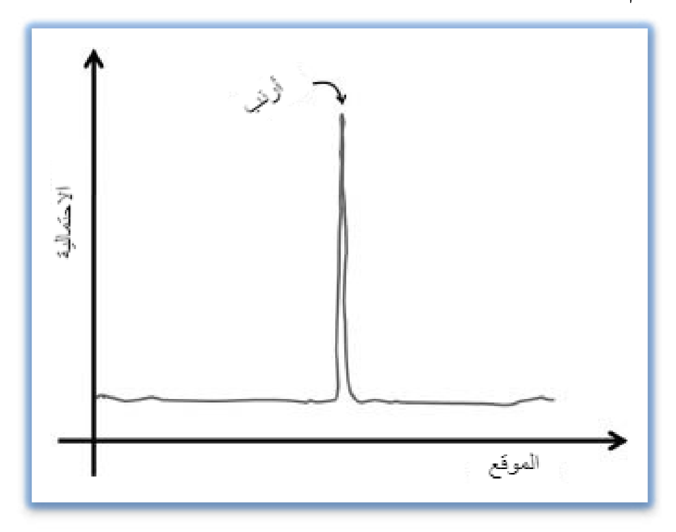
إن الريبة الجوهرية هي نتاج طبيعة الجسيمات الكمية المزدوجة. فكما استعرضنا في الفصل السابق، برهنت التجارب على امتلاك المادة والضوء كلا الخصائص الموجية والجسيمية في آن واحد. ولما كنا نريد وصف الجسيمات الكمية رياضيًا -وشغل الفيزياء الشاغل وصف الواقع رياضيًا- فإننا نحتاج إلى طريقة نكتب بها معادلات هذه الأشياء ليكون لها خصائص الموجات والجسيمات في ذات الوقت. الطريقة الوحيدة لفعل ذلك هي بجعل زخم الجسيمات الكمية وموضعها كميات غير محددة (فيها ريبة).

إعداد جسيم كمي: موجات الاحتمالية

تتمثل الطريقة المعتادة منذ أواخر عشرينيات القرن العشرين لوصف الجسيمات رياضيًا بـ«الدالة الموجية» الكمية. وهي دالة رياضية ذات قيمة في كل نقطة من الفضاء، يعطي مربع كل قيمة منها احتمالية إيجاد الجسيم في مكان وزمان محددين.

السؤال هنا: أي نوع من الدوال الموجية يوفر توزيعًا احتماليًا يشمل كلا الخصائص الموجية والجسيمية؟

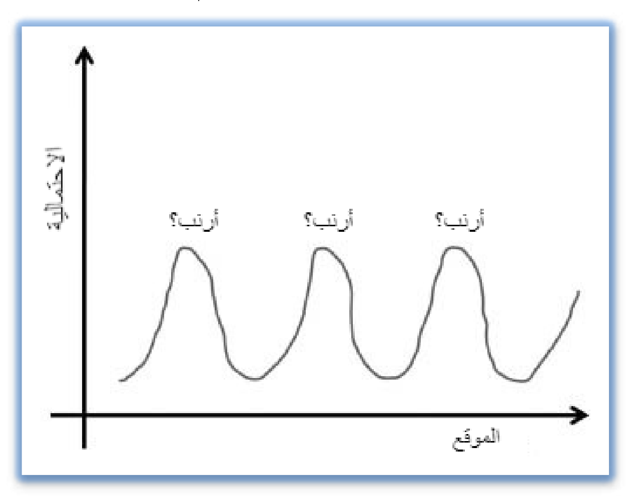
نحن نعلم أن إعداد توزيع احتمالي لجسيم كلاسيكي ليس عسيرًا، وهو يشبه الرسم:



ترى في الرسم أن احتمالية إيجاد الجسيم (ولنقل إنه الأرنب المزعج في الحديقة الخلفية) تساوي صفرًا في كل مكان، إلا في مكان الجسم المحدد تمامًا. على سبيل المثال، ترى عندما تنظر إلى الحديقة:

لا شيء، لا شيء، لا شيء، أرنب!، لا شيء، لا شيء، لا شيء.

لكن هذه الدالة الموجية لا تستوفي متطلباتنا، لكون موقعها محددًا بدقة يتمثل بطفرة مفردة، وليس للطفرة طول موجي. تذكَّر أن الطول الموجي يرتبط بزخم الأرنب، والزخم هو إحدى الكميات التي نحاول تمثيلها، لذا لا بد أن يكون للطول الموجي قيمة. إذًا، كيف نرسم توزيعًا احتماليًا بطول موجي ظاهر؟ هذا يسير كذلك، إنه يشبه الرسم:

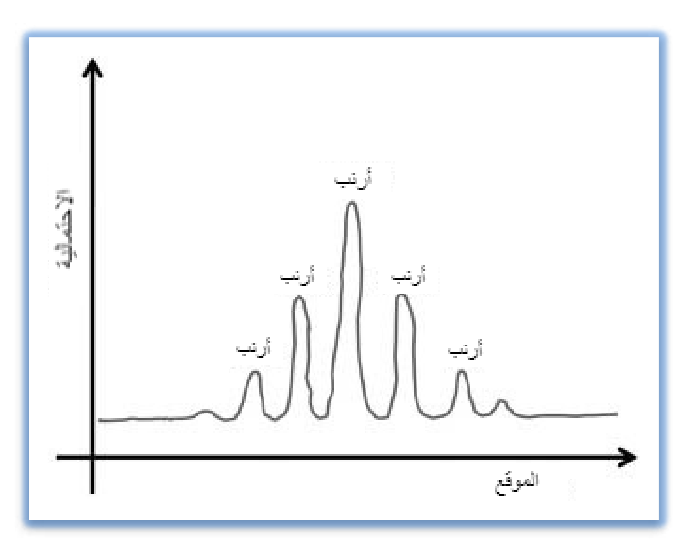


ترى في الرسم أن احتمالية إيجاد الأرنب في موقع محدد تتذبذب كالتالي:

أرنب، أرنب، أرنب، أرنب، أرنب، أرنب، أرنب، أرنب...

وكما السابقة، لا تستوفي هذه الدالة الموجية متطلباتنا أيضًا. نعم قيمة الطول الموجي يسيرة التعريف هنا (فقط قس المسافة الأفقية بين قمتين متجاورتين)، لذا هناك قيمة محددة للزخم؛ لكننا نعجز عن تحديد موضع محدد للأرنب. هناك احتمالية جيدة لإيجاد الأرنب في مختلف الأماكن في الفناء، إنه منتشر فيه كله. نعم هناك أماكن تقل فيها احتمالية وجود الأرنب، لكنها صغيرة نسبيًا.

نحن نحتاج إلى «حزمة موجية»، إلى دالة موجية تجمع الخصائص الموجية والجسيمية في توزيع احتمالي واحد، مثل التالية:



هذه الدالة الموجية هي التي نريدها تمامًا، إنها:

لا شيء، لا شيء، أرنب، أرنب، **أرنب،** أرنب، أرنب، لا شيء، لا شيء.

يحتمل فيها وجود الأرنب في منطقة صغيرة من الفضاء، وتقل احتمالية وجوده خارجها وصولًا إلى الصفر. نلاحظ ضمن تلك المنطقة تذبذبات في الاحتمالية تتيح لنا قياس الطول الموجي، والزخم بالنتيجة.

تحتوي هذه الدالة الموجية على الخصائص الموجية والجسيمية التي ننشدها، إذ فيها عدم يقين (ريبة) في كل من موضع الجسيم وزخمه.

أما عن الريبة في الموضع، فهي واضحة تلاحظ بالنظر إلى الحزمة الموجية. إذ لا يمكن حصر موضع الأرنب في مكان واحد، بل يمكن تحديد أماكن مختلفة في منطقة صغيرة يحتمل أن يوجد فيها. يرجح في هذه الدالة الموجية إيجاد الأرنب في مركز الحزمة الموجية، لكن هناك احتمالية أقل لإيجاده إلى يمينها أو يسارها. النتيجة أن الموضع الذي تصفه هذه الحزمة الموجية فيه ريبة بالضرورة.

أما عن الريبة في الطول الموجي فإنها ليست بذلك الوضوح، لكنها

موجودة لأن هذه الحزمة الموجية هي في الحقيقة مجموع موجات كثيرة، كل موجة منها ذات زخم مختلف قليلًا.

تحتوي كل موجة من تلك الموجات الكثيرة -المجموعة لتكوين هذه الحزمة الموجية- على زخم محدد ممكن للجسيم، لذا، كما هناك عدة أماكن يحتمل وجود الأرنب فيها، هناك عدة قيم مختلفة ممكنة لزخم الأرنب. إن الزخم حسب هذه الحزمة الموجية فيه ريبة بالضرورة.

كيف نستطيع تحصيل حزمة موجية بجمع موجات كثيرة؟

حسنًا، لنبدأ بموجتين تقليديتين، الأولى تمثل أرنبًا يتنقل في الحديقة بأناة، والثانية ذات طول موجي أقصر (يظهر المخطط في الصفحة التالية 18 اهتزازًا للموجة الأولى و20 للثانية) تمثل أرنبًا يتحرك أسرع، ربما لعلمه بوجود كلبة قريبة. ولنجمع هاتين الدالتين الموجيتين معًا.

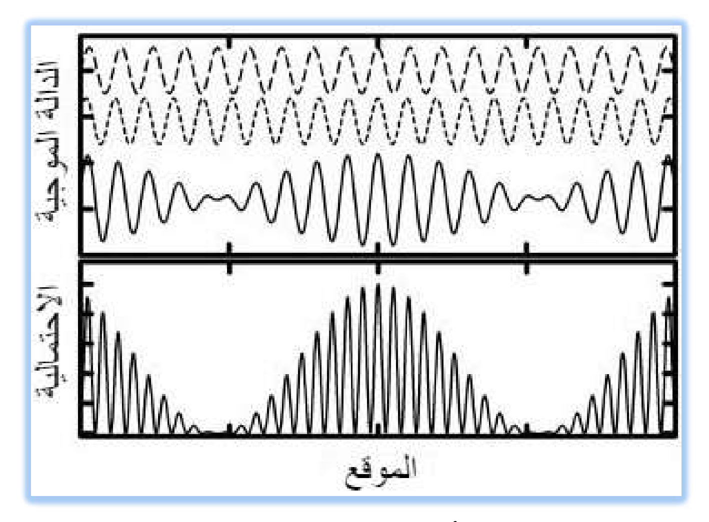
• • •

- مهلًا لحظة، بات لدينا أرنبان؟
- لا. تصف كل دالة موجية أرنبًا بزخم معين، لكنه ذات الأرنب.
- لكن، ألا تعني إضافتهما أن لديك أرنبين؟
- كلا، بل تعني أن لديك حالتين[3] يمكن أن تجدي فيهما الأرنب الواحد. هناك احتمالية لإيجاد الأرنب يتحرك بروية في الحديقة، وهناك احتمالية لإيجاده يتحرك أسرع. وطريقة وصف ذلك رياضيًا هي بجمع الموجتين.
- تعسًا، تمنيت المزيد من الأرانب.

---

[3] تشير «الحالة» في الفيزياء إلى مجموعة معينة من الخصائص (السرعة والزخم والطاقة وما شابه) على سبيل المثال: يشار إلى أرنب في الحديقة بزخم معين بأنه في حالة زخم، وإن كان هناك أرنب آخر بذات الزخم في ذات الحديقة سيكون بالحالة نفسها، وإن كان هناك أرنب ثالث في الحديقة نفسها لكن بزخم مختلف فهو في حالة مختلفة. أما أرنب رابع في حديقة أخرى بزخم يشابه زخم الأرنب الأول فهو في حالة رابعة وهكذا.

نجد بجمع الموجتين أن هناك أماكنَ تتوافق فيها الموجات في الطور فتتداخل لتكون موجة أكبر، وهناك أماكن تختلف فيها الموجات في الطور فتلغي بعضها. تحتوي الدالة الموجية التي تنتج من جمع الموجتين (الخط غير المتقطع) على بعض النتوءات، أي إن هناك أماكنَ نرى فيها موجات وأماكنَ لا نرى فيها شيئًا. وللحصول على التوزيع الاحتمالي فإننا نربع تلك القيم، والنتيجة هي الموجة في أسفل الرسم:

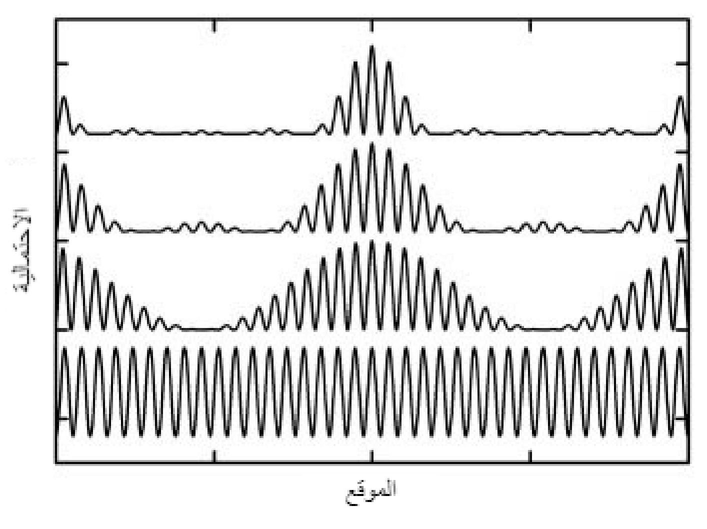


يمثل المنحنيان المتقطعان في أعلى الرسم الدالتين الموجيتين لموجتين مختلفتين (وهما مزاحتان لتستطيع رؤيتهما بوضوح). ويمثل الخط غير المتقطع (المستمر) مجموع الدالتين. ويظهر الشكل في الأسفل التوزيع الاحتمالي (مربع الخط المستمر).

يبدو الجزء الوسطي من هذا التوزيع الاحتمالي (في الأسفل) ملائمًا لما نطلب. فهناك منطقة باحتمالية جيدة لإيجاد الأرنب فيها، وهي تحتوي على طول موجي مرتبط بحركته. وتنخفض الاحتمالية خارج تلك المنطقة إلى الصفر، أي إن هناك أماكنَ لا يحتمل أن يوجد فيها الأرنب على الإطلاق.

لكن في ذات الوقت، ليست هذه الدالة الموجية المتكونة من موجتين

غاية الطلب، لأن المنطقة التي لا يحتمل فيها وجود الأرنب ضيقة جدًا ومتبوعة بنتوء آخر. لحسن الحظ فإننا نستطيع تحسينها بإضافة المزيد من الموجات:



يمثل الشكل في الأسفل التوزيع الاحتمالي لموجة ذات تردد واحد، وأعلاه رسوم موجة ذات ترددين فثلاثة فخمسة.

تضيق المنطقة التي يحتمل أن يوجد الأرنب فيها عند إضافة ثلاث موجات مختلفة، وتضيق أكثر عند إضافة خمس موجات. وكلما أَضفنا موجات أكثر ضاقت مناطق الاحتمالية العالية واتسعت المسافات بينها. وما ننتهي إليه سيبدو أشبه بسلسلة طويلة من حزم موجية.

• • •

- إذًا بات لدينا سلسلة طويلة من الأرانب؟ ظننتُ أنك تتكلم عن أرنب واحد!

- ونحن نتكلم عن أرنب واحد بالفعل. ما بات لدينا هو سلسلة من الحزم الموجية المختلفة، كل منها يمثل مكانًا مختلفًا قد نجد فيه الأرنب

الوحيد. وإن أردنا تضييق تلك الأماكن إلى موضع واحد للأرنب، فإننا نضيف توزيعات مستمرة من الأطوال الموجية، لا مجموعة أطوال موجية منفردة منتظمة التباعد وحسب.

- ألا يعني هذا إضافة عدد لا نهائي من الأطوال الموجية المختلفة؟

- حسنًا، نعم. وهنا يأتي دور التفاضل والتكامل.

- لست جيدة فيهما.

- يندر وجود كلاب جيدة في ذلك... لكن ثقي بي، يمكننا إعداد حزمة موجية واحدة بجمع توزيعات مستمرة من الأطوال الموجية ذات الاحتماليات المختلفة.

- ونحصل على أرانب لا نهائية؟

- لا للأسف. إنه ذات الأرنب الواحد، لكن باحتماليات لا نهائية لسرعات متقاربة جدًا من بعضها.

- تعسًا، ما زلت أريد المزيد من الأرانب.

- حسنًا، اعلمي أن الدوال الموجية اللانهائية تحدد الموقع بدقة عالية، لذا ستعرفين موقع ذلك الأرنب الوحيد في الأقل.

- صحيح. وإن علمت موقعه، سأصيده!

حدود الواقع: مبدأ الريبة

ماذا يعني جمع الكثير من الموجات ذات الأطوال الموجية المختلفة بهذه الطريقة؟

ترتبط كل موجة بزخم مختلف (أي بسرعة مختلفة للأرنب الواحد الذي يتحرك في الحديقة)، ومعنى إضافتها إلى بعضها أن هناك احتمالية لإيجاد الأرنب في أي حالة من تلك الحالات (سنفصِّل مفهوم الحالات في الفصل الثالث). هذا الجمع هو مسبب مبدأ الريبة. وتفصيل ذلك التالي: نحتاج إلى جمع عدد كبير من الموجات لنستطيع إعداد حزمة موجية ضيقة (محددة جيدًا) تتيح لنا معرفة موضع الأرنب بدقة. وهذا الجمع يسبب زيادة الريبة (عدم اليقين) في قيمة الزخم، لأن لكل موجة مضافة زخم مختلف للأرنب. أي يحتمل أن يتحرك الأرنب الذي عرفنا موقعه بأي سرعة من السرعات الكثيرة المرتبطة بموجاته المختلفة المضافة.

من جهة أخرى، يتحتم علينا إن أردنا معرفة الزخم بدقة إضافة عدد قليل من الأطوال الموجية وحسب، وهذا ينتج حزمة موجية واسعة جدًا، أي ريبة (عدم دقة) كبيرة في الموضع. ليس للأرنب بهذه الطريقة غير عدد قليل من السرعات التي يحتمل أن يتحرك بها، لكننا لا نستطيع تحديد موقعه بيقين كبير.

لا يمكننا إعداد حزمة موجية بموضع وحيد محدد بدقة إلا بإضافة عدد لا نهائي من الأطوال الموجية. ولا يمكننا إعداد حزمة موجية بزخم وحيد محدد بدقة إلا بجعلها تنتشر في الفضاء بأسره. أفضل ما بالإمكان السعي وراء حزمة موجية مثل التي رسمناها في البداية، أي ذات ريبة صغيرة في الزخم وريبة صغيرة في الموضع.

وبالتطرق للتفاصيل الرياضية، نجد أن أفضل ريبة يمكن تحصيلها تطابق معادلة هايزنبيرغ الشهيرة:

الريبة في الموضع* الريبة في الزخم= ثابت بلانك÷ 4* النسبة الثابتة

$$\Delta x\ \Delta p = h/4\pi$$ [4]

ولا يمكن لأي حزمة موجية أن تكون بريبة أصغر من هذه، لذا عادة ما تكتب المعادلة السابقة باستبدال رمز «=» برمز «≤».

مع هذا فإن النتيجة الجوهرية هي ذاتها: لا يمكن أن تكون الريبة في كلا المتغيرين ($\Delta x, \Delta p$) تساوي صفرًا بغض النظر عن الطريقة المستخدمة، فكلما قللت قيمة إحداها ارتفعت قيمة الأخرى، وظل النتاج أكبر أو يساوي ثابت هايزنبيرغ ($h/4\pi$).

آمل الآن، بعد هذا الاستعراض للمبدأ بدواله الموجية، أنك فهمت أن هذه العلاقة (بين الزخم والموضع) ليست مجرد حد عملي سببه عجزنا عن قياس حالة نظام دون تعكيره؛ بل إنها إفادة بيّنة بخصوص حدود الواقع.

لقد رأينا في الفصل الأول كيف أن الجسيمات الكمية تسلك سلوك الجسيمات (في ظاهرة كومبتون، حيث للفوتونات زخم وتصدم الإلكترونات)، وكيف أنها -هي ذاتها- تسلك سلوك الموجات (في حيود الإلكترونات والذرات والجزيئات حول العوائق، وإظهارها أنماط تداخل). ضريبة امتلاك الجسيمات كلا الخصائص الموجية والجسيمية هي الريبة الحتمية في الموضع والزخم.

إن فحوى مبدأ الريبة ليس استحالة قياس الموضع والزخم بدقة وحسب، بل إن هاتين الكميتين غير موجودتين أساسًا.

---

[4] كما يعرف أي كلب متعلم فإن «Δ» هو رمز دلتا اليوناني. يستخدم هذا الرمز في العلوم للإشارة إلى تغير في شيء أو إلى فرق بين شيئين. تمثل Δx الريبة في الموقع أو الفرق المتوقع بين الموقع الذي قسته في الواقع والذي رجحته الدالة الموجية. إن قلتُ «دفنتُ عظمة لذيذة في مكان يبعد عن شجرة البلوط الباسقة 16 خطوة، زائد أو ناقص خطوة» فإن «16 خطوة» هي أرجح موقع للعظمة و«زائد أو ناقص خطوة» هي Δx.

تجليات مبدأ الريبة: طاقة النقطة الصفرية

يجبرنا مبدأ الريبة على إعادة نظر شاملة لفهمنا لآلية الكون. فلا يغير نظرتنا إلى الجسيمات المفردة المتحركة وحسب، بل تمتد آثاره شاملة بنية المادة في المستوى الصغروي.

يتخيل معظم الناس -والكلاب- الذرة كمجموعة شمسية مصغرة، فيها إلكترونات سالبة الشحنة تدور حول نواة موجبة. وهو تخيل رسمه نيلز بور عام 1913 حين اقترح أول نموذج كمي لذرة الهيدروجين.

حسب نموذج بور، لا يمكن أن يدور الإلكترون الوحيد لذرة الهيدروجين حول النواة إلا بمدارات محددة جدًا لها قيم طاقة محددة جيدًا. تسمى تلك المدارات «الحالات المسموح بها» للهيدروجين، وسيسعد الإلكترون الذي يشغل إحداها بالبقاء فيه. ولا يمكن أن يوجد الإلكترون بين مستويين من الطاقة (في مدار يتوسط المدارين المسموح بهما).

يشبه الفيزيائيون هذه الحالات بدرجات السلم في العادة، والإلكترون بكلبة تبحث عن مكان تنام فيه. يمكن أن تنام الكلبة على الأرض أو إحدى الدرجات، لكن أي محاولة للاستلقاء بين درجتين ستكون ذات عواقب وخيمة.

تألق نموذج بور في وصف ألوان الضوء المميزة التي تبعثها ذرة الهيدروجين وتمتصها. إذ قال إن الإلكترون يتحرك بين حالتي طاقة مسموح بهما عبر امتصاص فوتون (ضوء) أو إطلاقه، بتردد يتناسب وفرق الطاقة بين تلكما الحالتين. وهكذا أزاح نموذج بور ما كان حجر عثرة في طريق الفيزيائيين لسنين.

كان اقتراح بور لنموذجه جريئًا حينها. لكن هذا النموذج لسوء الحظ، كان خليطًا ناقصًا من الفيزياء الكلاسيكية والكمية، وافتقر إلى الأساس النظري المتين. توفر هذا الأساس لاحقًا بفضل نموذج دي برولي الموجي

للإلكترون. لكن في حين تسوغ الازدواجية الجسيمية الموجية فكرة الحالات المحددة (المسموح بها)، فإنها تلزمنا طرد خيال دوران الإلكترون حول النواة كما الكواكب حول الشمس.

المشكلة الأساسية في ذلك التخيل هي ذاتها التي أدت إلى مبدأ الريبة. إذ يستوجب نموذج المجموعة الشمسية أن يكون للإلكترون موقع محدد بدقة في مكان ما من المدار المسموح به، وكذلك زخم محدد بدقة يدوِّره حول ذلك المدار. وأنت تعلم سلفًا لم لا يمكن ذلك، إذ إن محاولة تحديد موقع الإلكترون بدقة كافية لمعرفة مكانه في المدار الكوكبي، تُلزم أن تكون الريبة في زخمه هائلة، ما يعني أننا لا نستطيع تحديد وجهته، ومحاولة تحديد زخم الإلكترون بدقة كافية لمعرفة في أي مدار كوكبي هو، تُلزم أن تكون الريبة في موقعه هائلة، ما يعني أننا لن نستطيع حتى التأكد من أنه بقرب النواة التي يفترض أن يدور حولها.

تجبرنا الطبيعة الموجية للإلكترونات على نبذ فكرة دورانها كالكواكب. فهي عوضًا عن ذلك تحوم حول النواة بهيئة سحابة، ذات موقع غير محدد (فيه ريبة) لكنه محصور بمنطقة قرب النواة، وذات زخم غير محدد لكنه محصور بقيم تبقيها قرب النواة. ما تزال فكرة حالات الطاقة المسموح بها لبور صحيحة في أن الإلكترون محدود بقيم الطاقة التي تتنبأ بها نظريته، لكنها نبذت فكرة دوران الإلكترونات في مدارات معينة.

• • •

- مهلًا لحظة، الإلكترون إذًا ليس في مكان محدد، بل قرب النواة وحسب؟

- نعم، تمامًا. تتناسب حالات الطاقة المختلفة مع الاحتماليات المختلفة لإيجاد الإلكترون في موضع معين، وتوفر حالات الطاقة العليا فرصة أكبر لإيجاد الإلكترون بعيدًا عن النواة مقارنة بالمستويات الدنيا. لكن لأي من حالات الطاقة المسموح بها، يمكن أن يوجد الإلكترون في أي نقطة ضمن

بضعة نانوات عن النواة.
- وماذا يحدث إن كان لديك ذرتان متقاربتان؟
- إن قاربت بين ذرتين بما يكفي، يمكن أن ينتهي الحال بالإلكترون المرتبط بذرة منهما بالوجود في الذرة الأخرى، بسبب الريبة الكمية في الموضع التي شرحناها. وسنفصل ذلك أكثر في الفصل السادس حين نتحدث عن النفق الكمي.
- حسنًا.
- بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تكون هناك حالات يكون فيها الإلكترون «مُشارَكًا» نوعًا ما بين ذرتين. هكذا تتشكل الروابط الكيميائية. وإن صففتِ مجموعة من الذرات في هيكل صلب، فإنها تستطيع التشارك جميعًا بإلكترون واحد. وهذا أساس النظرية الكمية للمواد الصلبة، التي فسرت كيف توصل المعادن الكهرباء، وبينت لنا كيف نصنع رقائق حاسوبية من أشباه الموصلات. كل ذلك بفضل امتداد الإلكترونات إلى ما وراء المدارات الكوكبية.
- غريبة هي الإلكترونات ذات الريبة.
- لأكون دقيقًا، الإلكترونات ليست الوحيدة ذات الريبة. كل ما في الكون خاضع لمبدأ الريبة، وفي سرعته وزخمه عدم يقين.
- غير صحيح. أعني، أستطيع أن أرى عظمتي هناك، إن لها موقعًا محددًا وسرعة محددة تساوي صفرًا!
- هذا لأن عدم اليقين العملي المتضمن في عملية القياس يحجِّم ظهور عدم اليقين الكمي لعظمتك. فعندما تنظرين إلى عظمتك بدقة...
- أنا دائمًا أنظر إليها بدقة.
- على أي حال، عندما تنظرين إلى عظمتك بدقة، ربما تستطيعين قياس موقعها بهامش خطأ قدره بضعة مليمترات. وقد تستطيعين بجهود جبارة أن تجعليه ينخفض إلى مئات النانوات وحسب. وفي هذه الحالة، ستكون الريبة في سرعة عظمتك التي تزن مئة غرام نحو 10^{-27} متر في الثانية

وحسب. أي إن السرعة ستكون صفرًا مضاف إليه 10^{-27} متر في ثانية أو منقوص منه.

- هذا بطيء جدًا.

- بالفعل. سيستغرق الجسم الذي يتحرك بهذه السرعة زمنًا بطول عمر الكون ليتجاوز مسافة قدرها ذرة واحدة.

- هذا بطيء جدًا جدًا.

- نحن نعجز عن ملاحظة الريبة الكمية في الاجسام المألوفة لأنها كبيرة جدًا لا أكثر. ونراها مباشرةً فقط عند مراقبة جسيمات صغيرة جدًا محصورة بمساحات صغيرة جدًا.

- مثل الإلكترونات قرب الأنوية!

- تمامًا.

• • •

علاوة على كل ما سبق، فإن لمبدأ الريبة تأثير أعمق في هيكل الذرات. فوجوب وجود ريبة في كلا زخم الإلكترون وموقعه تعني أن طاقة الإلكترون في الذرة لا يمكن أن تساوي الصفر أبدًا. لأن هذا سيعني أن الإلكترون لا يتحرك بل يتموضع فوق النواة. وهذا مستحيل كما رأينا، إذ إن أفضل حزمة موجية ممكنة للإلكترون هي تلك الضيقة التي تتمحور حول النواة، وهي تتضمن مختلف الحالات ذات الزخم (الذي لا يساوي صفرًا). لذا فإن في أقل حالة طاقة مسموح بها للهيدروجين بعض الطاقة. وهذه ظاهرة عامة تنطبق على أي جسيم كمي مقيد.

إنَّ عِلمَنا بوجود جسيم في مكان ما من الفضاء يحد الريبة في موضعه، ويزيد الريبة في زخمه. ويستحيل أن تكون الجسيمات الكمية المقيدة في حالة سكون تام، إنها أشبه بجراء في سلة، دائمًا تتلوى وتتدحرج وتتحرك قليلًا، حتى عند نومها.

تسمى هذه الحركة القليلة المتبقية طاقة النقطة الصفرية، وهي أقل طاقة كمية للجسيم بسبب تقيده. إنها أدنى حد ممكن من الطاقة التي يحتوي عليها جسيم مقيد، بمعنى أنكِ لن تستطيعي أبدًا تهيئة نظام لا تكون جسيماته في حالة حركة دائمة مع بعض التقلبات العشوائية التي تغير اتجاه سرعتها وقيمتها باستمرار.

تعد فكرة طاقة نقطة الصفر من أكثر مفاهيم فيزياء الكم صدمة، فهي تصرح باستحالة وجود شيء في حالة سكون تام! هذا يعني دوام وجود بعض الطاقة في أي نظام، بغض النظر عن الجهد المبذول في محاولة استخراجها.

حتى الفضاء الخالي له طاقة نقطة صفرية، وهذا يقود إلى نتاجات مفاجئة، منها الانبعاث المفاجئ للفوتونات من الذرات، وكذلك القوى الضئيلة بين ألواح معدنية في نظام مفرغ (تسمى قوى كازيمير).

بل وتسبب طاقة نقطة الصفرية للفضاء الفارغ تخليق أزواج «جسيمات افتراضية» قصيرة العمر، وهذا ما سنفصله في الفصل التاسع.

إن وجود طاقة النقطة الصفرية هي نتيجة مباشرة للطبيعة الكمية لجميع الجسيمات التي تشكل الكون، وربما تمثل أكثر مخرجات مبدأ الريبة مفاجأة.

• • •

- إذًا، الفكرة من كل هذا أن ليس هناك قيم محددة للزخم والموقع؟

- نعم، تمامًا.

- وهل هذه الكميات هي الوحيدة؟

- لا. هناك الكثير من علاقات عدم اليقين (الريبة) بين أزواج الكميات الفيزيائية. مثلًا هناك الريبة في الزخم الزاوي (لا تستطيع معرفة اتجاه دوران جسيم وسرعة دورانه في ذات الوقت). وهناك علاقة ريبة بين عدد

الفوتونات في شعاع الضوء وطور موجته. علاقات الريبة شائعة في فيزياء الكم.

- هذا يعني أن ليس هناك قيم ثابتة بالمعنى المطلق؟ أليس هذا نوعا من... ما بعد الحداثة؟

- ليس الأمر بذلك السوء، فهذا لا يعني أن التجارب المختلفة تنتج نتاجات مختلفة. الريبة بسبب التأثيرات الكمية صغيرة جدًا عمومًا، لذا يمكننا عمليًا معاملة الأجسام الكبروية كما لو أن لها خصائص محددة. لكن ليست هناك قيمة محددة لأي من تلك الكميات في العالم الصغروي.

- لكنك تحدثت سابقًا عن قياس الأرانب في مواقع محددة! كيف يمكن ذلك إن لم يكن لها موقع محدد؟

- هذا سؤال رائع، ينقلنا إلى الفصل التالي، حيث المزيد من الغرائب.

الفصل الثالث

كلبة شرودنغر: تفسير كوبنهاغن

كنت في المطبخ ارتشف كوبًا من الماء، وإذ بإيمي تدخل عليّ مسرعة وهي تهز ذيلها، قالت: يجب أن تعطيني مقرمشات.

- يجب؟ لماذا عليَّ ذلك؟

- لأني كلبة جيدة جدًا، وأستحق المقرمشات!

- لن أعطيك إياها بلا سبب. لكن إليك ما سأفعل...

[مددت يدي إلى إناء المقرمشات، ووضعت قطعتين في قبضتيّ ومددتهما]

... إن حزرتي أين وضعتها، ستحصلين عليها!

- [بدأت تشم فورًا]

- [وضعت قبضتيَّ خلف ظهري]

يمنع الشم. خمني أين هي المقرمشات.

- مم... في كليهما!

- هذا ليس أحد الخيارين.

مطت شفتيها عبوسًا وقالت: لكنه الاختيار الصحيح. مثل تلك القطة في الصندوق.

- أي قطة، وأي صندوق؟

- أنت تعلم، تلك التي في صندوق... مع ذلك الشيء... حية وميتة في الوقت نفسه... في الصندوق.

- قطة شرودنغر؟

- نعم هي! [هزت ذيلها بحماس]

أحب تلك التجربة، يجدر بك إجرائها!

- مبدئيًا إنها مجرد تجربة فكرية لتوضيح لا منطقية التنبؤات الكمية، لم يجرها أحد فعلًا. ثم إني لا أظن الناس ستحبذ أن نبدأ بقتل القطط!

- لست مهتمة بفكرة القتل، أنا أحب وضع القطط في صناديق وحسب. القطط تنتمي للصناديق.

- سأوصل رسالتك إلى المجتمع العلمي. على أي حال، ما علاقة هذا بالمقرمشات؟

- حسنًا، ربما المقرمشات في كفك الأيمن، وربما هي في الأيسر. لست أعلم أين هي، ولست بتاركي أشم لأكتشف، هذا يعني أنها في حالة تراكب كمي بين كلا كفيك. فالجواب هو أنها في الكفين معًا إلى أن أقيس في أي كف هي.

- حجة جيدة. مع أنها لا تنطبق على هذه الحالة.

- بل تنطبق عليها، إنها من أساسيات الفيزياء الكمية.

- نعم صحيح أن الأجسام غير المقاسة تكون في حالة تراكب كمي عمومًا. لكن هذه الحالات واهية جدًا، وأي تغير صغير -ولو إطلاق أو امتصاص فوتون- سيسبب انهيارها إلى حالات كلاسيكية ذات قيمة محددة.

- ولاحظها الناس رغم ذلك!

- نعم، لقد أجريت الكثير من تجارب «حالة القطة». لكن اقتصر أكبر تشابك كمي استطعنا إنجازه على قرابة مليار إلكترون[1]، هذا لا يقارن بمقرمشات الكلاب، التي تحتوي على نحو 10^{22} ذرة.

- أوه.

---

[1] كما سنرى في الفصل الرابع.

- علاوة على ذلك، حتى في أكثر نسخ تفسير كوبنهاغن تطرفًا، يجب وجود مراقب واعٍ يقيس الجسم لتنهار دالته الموجية. يمكنك المجادلة بخصوص من يعدُّ واعيًا...

- قطعًا ليست القطط، القطط غبية.

- ... لكني أعد واعيًا بكل المعايير. وأنا أعلم في أي كف هي المقرمشات. لذا أنتِ أمام توزيع احتمالية كلاسيكي، حيث المقرمشات في أحد الكفين وحسب، لا تراكب كمي حيث المقرمشات في كليهما.

- أوه، حسنًا. [بدت محبطة]

- إذًا، خمني في أي كف هي المقرمشات.

- مم... ما زلت أقول في كليهما.

- لماذا هذا.

- لأنني كلبة رائعة. وأستحق قطعتي مقرمشات!

- وأنا فاشل.. فقد أَصبتِ.

أعطيتها المقرمشتين فراحت تأكلهما بسعادة وتتمتم: مقرمشات! لذيذة!

• • •

أكبر منغص تواجهه في دراسة ميكانيك الكم اكتشافك أن العالم كلاسيكي بتعنت. إذ لا نرى في محيطنا أيًا من الأشياء العجيبة الموجودة في الفيزياء الكمية (تصرف الموجات كجسيمات والعكس، ووجود الأجسام في مكانين معًا، والقطط حية وميتة في ذات الوقت). حين نراقب الأجسام الكبيرة المألوفة، لا نشهدها إلا بحالة كلاسيكية محددة -مثل موقع محدد وسرعة معينة وزخم مقدر وما شابه- وتغيب عنا كل تلك التراكيب الغريبة من الحالات التي تتيحها ميكانيك الكم. تبدو الجسيمات مختلفة تمامًا عن الموجات، والكلاب تعبر العوائق باجتيازها من جهة واحدة وحسب، والقطط حية بعناد ولا ترضى أن تشمها الكلاب الغريبة.

لا نستطيع ملاحظة السمات الغريبة لميكانيك الكم مباشرة إلا بجهد جهيد، في ظروف مجهزة بدقة. لأن الحالات الكمية واهية جدًا وسهلة التحطم، وسبب ذلك ليس واضحًا تمامًا. في الحقيقة، تحديد علة عدم انطباق القواعد الكمية على العالم الكبروي بكلابه وقططه لمشكلة عويصة على نحوٍ مفاجئ. فقد أشكل تحديد تفاصيل ما يحدث في الانتقال من العالَم الصغروي (يخضع للقوانين الكمية) إلى الكبروي (عالمنا المرئي الخاضع للقواعد الكلاسيكية) على ألمع الفيزيائيين في المئة عام الأخيرة، وما زالت الإجابات غير واضحة.

نفصل في هذا الفصل المبادئ الأساسية الضرورية لفهم الفيزياء الكمية، وهي: الدالة الموجية، والحالات المسموح بها، والاحتمالية، والقياس. ونقدم نظامًا نموذجيًا شاملًا، ونتحدث عن تجربة يسيرة توضح كل السمات الأساسية للفيزياء الكمية. ونوضح العشوائية الإلزامية للقياس الكمي؛ والمشاكل الفلسفية التي تنتج عنها، المشاكل العويصة حد أن بعض مؤسسي الفيزياء الكمية يأسوا من حلها.

ماذا تعني الدالة الموجية؟ تفسير ميكانيك الكم

تتمحور معظم المشاكل الفلسفية في ميكانيك الكم حول «التفسير». وهذه مشكلة تنفرد بها النظرية الكمية دون غيرها، لانتفاء حاجة الفيزياء الكلاسيكية إلى تفسير. نتنبأ في الفيزياء الكلاسيكية بالموضع والسرعة والتعجيل لجسم ما، عالمين تمام العلم ما تعنيه هذه الكميات وكيف نقيسها؛ هناك صلة بدهية بين النظرية الكلاسيكية والواقع الذي نراه.

لكن الفيزياء الكمية ليست بذات الوضوح. نحن نملك المعادلات الرياضية التي تحكم النظرية وتتيح لنا حساب «الدوال الموجية» والتنبؤ بسلوكها، لكن ماهية هذه الدوال الموجية ليست واضحة لأول وهلة. نحن بحاجة إلى «تفسير»، إلى طبقة أخرى من الشرح تربط الدالة الموجية التي نحسبها بالخصائص المقاسة في التجارب.

تُستعرض العناصر الأساسية للفيزياء الكمية بطرائق عديدة، بعدد ما هناك كتب عن الموضوع، لكنها جميعًا تستند إلى أربعة مبادئ جوهرية. يمكنك التفكير فيها بأنها نواة النظرية، أو قواعدها الأساسية التي عليك قبولها قبل الغوص فيها. هذه المبادئ هي التالية:

- الدوال الموجية: يوصف كل شيء في الكون باستخدام دالة موجية كمية.
- الحالات المسموح بها: لا يمكن أن ترصد «الأجسام» الكمية إلا في حالة واحدة من عدد محدود من الحالات المسموح بها (المتاحة).
- الاحتمالية: تحدِد الدالةُ الموجية للجسم احتماليةَ رصده في أي حالة من الحالات المسموح بها.
- القياس: قطعًا وحتمًا، يحدِد قياسُ حالةِ جسمٍ ما، حالةَ ذلك الجسم.

أما عن الدوال الموجية: يوصف كل جسم أو نظام في الكون بدالة موجية، وهي دالة رياضية ذات قيمة في كل نقطة في الفضاء. أي إن لكل ما تقيس (سواء كان إلكترونًا أو قطعة مقرمشات أو قطة في صندوق) دالة موجية، وهي ذات قيمة في كل مكان. قد تكون موجبةً أو صفرًا أو سالبةً أو عددًا تخيليًا، لكنها قطعًا ذات قيمة.

هناك معادلة رياضية تسمى معادلة شرودنغر تحكم سلوك الدوال الموجية، وضعها العالم النمساوي المشهود له بالشقاوة إرفين شرودنغر[2]. تستطيع من خلالها حساب الدالة الموجية لجسم والتنبؤ بتغيرها مع الزمن، بمعلومية بعض الأشياء الأساسية عن ذلك الجسم بالطبع، أي بذات الطريقة التي تستطيع من خلالها استخدام قوانين نيوتن للتنبؤ بالموقع المستقبلي لكلبة تعرف موقعها الحالي وسرعتها. تحدد الدالة الموجية بدورها كل خصائص الجسم الممكن رصدها.

أما بخصوص الحالات المسموح بها: «الأجسام» الكمية قابلة للرصد في حالات معينة وحسب. وهذا المبدأ هو واضع «الكم» في «ميكانيك الكم»، فالطاقة في شعاع من الضوء تكون سيلًا من الفوتونات، يمثل كلُّ فوتونٍ كمًا واحدًا من الضوء لا يمكن أن ينقسم. يمكن أن يوجد فوتون واحد أو اثنان أو ثلاثة، لكن لن يوجد فوتون ونصف أو 3.14 فوتون.

وبالمثل، لا يمكن أن توجد الإلكترونات التي تدور حول النواة إلا في حالات معينة[3]. لكل من هذه الحالات طاقة معينة، وسيُرصد الإلكترون وله واحدة من هذه الطاقات دائمًا، وليس في حالة وسطية بينها. نعم

---

[2] تكاد سمعة شرودنغر السيئة لمصاحبته النساء تماثل حجم إسهاماته في الفيزياء. لقد ابتكر معادلته الشهيرة عندما كان في عطلة تزلج مع إحدى عشيقاته الكثر، وهو أبٌ لثلاث بنات من ثلاث نساء مختلفات، ليست واحدة منهن زوجته (التي كانت عالمة بعلاقاته بالمناسبة). كلفته حياته الشخصية غير التقليدية منصبًا في جامعة أكسفورد بعد أن هجر ألمانيا عام 1933، لكنه استمر بالعيش لسنوات عديدة بانفتاح مع امرأتين (إحداهما زوجة زميل له).

[3] كما ناقشنا في آخر الفصل الثاني.

تستطيع الإلكترونات العبور بين هذه الحالات بامتصاص ضوء بتردد معين أو إشعاعه (مثلًا، الضوء الأحمر في مصابيح النيون هو بسبب انتقال الإلكترونات بين حالتين في ذرات النيون)، لكنها تعبر بين الحالات المختلفة آنيا دون المرور بحالة طاقة وسطية. وهذا أصل تعبير «قفزة كمية» الذي نستخدمه لوصف تغير كبير بين حالتين، تجدر الإشارة إلى أن قفزة الطاقة التي تحدث في الحقيقة صغيرة جدًا؛ لكنها تحدث فوريًا في لا زمن على الإطلاق.

أما المبدأ الثالث فيتمثل بفكرة الاحتمالية: تحدد الدالة الموجية لجسم ما احتمالية مختلف الحالات المسموح بها. إن كنت مهتمًا بمعرفة موقع كلبة ما، ستنبئك الدالة الموجية بوجود احتمالية عالية لإيجاد الكلبة في غرفة المعيشة، واحتمالية أقل لإيجادها في غرفة النوم المغلقة، واحتمالية ضئيلة جدًا لإيجادها على أحد أقمار المشتري. وإن كنت مهتمًا بمعرفة طاقتها، ستنبئك الدالة الموجية باحتمالية عالية لإيجادها نائمة، واحتمالية أقل لإيجادها تقفز وتنبح واحتمالية شبه معدومة لإيجادها هادئة تحل مسائلًا في التفاضل والتكامل.

وهنا تطرأ المشاكل الفلسفية، لأن الشيء الوحيد الذي لن تهبه لك الدالة الموجية هو اليقين. تتيح لك النظرية الكمية حساب الاحتماليات وحسب، لا النتاجات المطلقة. يمكنك القول إن هناك احتمالية لإيجاد الكلبة في غرفة المعيشة واحتمالية أخرى لإيجادها في المطبخ لكنك لن تستطيع الجزم بمكانها حتى تتحقق. وإن كررت ذات التجربة عند ذات الظروف (كأن تبحث عن مكان الكلبة في الرابعة مساءً)، ستجد نتاجات مختلفة في الأيام المختلفة، رغم ذلك، سيطابق جمع هذه النتاجات الاحتمالية التي تتنبأ بها الدالة الموجية. بوجيز القول، لن تستطيع الجزم بنتيجة كل قياس منفرد، بل فقط بالنتيجة الإجمالية من تجارب مكررة كثيرة.

تمثل العشوائية الكمية مشكلة عويصة لأولئك المعتادين على الفيزياء الكلاسيكية، حيث يمكن التنبؤ بنتاجات التجربة بدقة ناهية إن علمت الظروف الابتدائية والمتغيرات بدقة (ستعلم أن الكلبة ستكون في المطبخ، والبحث سيؤكد النتيجة التي علمتها مسبقًا). لكن الفيزياء الكمية ليست كالكلاسيكية، إذ يمكن للتجارب المتطابقة تمامًا أن تنتج نتاجات مختلفة، وكل ما يمكنك حسابه هو الاحتماليات. هذه العشوائية هي المشكلة الفلسفية التي أطلقت لسان آينشتاين بمختلف التعليقات التي صقلت إلى «الرب لا يلعب النرد بالكون»[4].

• • •

- الفيزيائيون سخفاء

- ما الدافع لقول هذا؟

- ما الشيء العويص بشأن العشوائية؟ أنا لا أعلم بنتاجات شيء قبل أن يحدث، وأنا بخير.

- لأنك كلبة لا فيزيائي. لكن حجتك جيدة، فحتى في الفيزياء الكلاسيكية، لا بد أن تتضمن نتاجات التجارب العملية بعض الاحتمالية، لأننا لا نستطيع الإحاطة بجميع الاضطرابات الصغيرة التي قد تؤثر في نتاجات التجربة.

- مثل تلك الفراشة في البرازيل، التي تسبب تغير حالة الطقس؟

- تمامًا. المجاز المعتاد هو إن فراشة ترفرف أجنحتها في الأمازون فتحدث عاصفة في سكنيكتادي بعد أسبوع. إنه المثال التقليدي لنظرية الفوضى، التي تظهر عدم القدرة على تفادي الاحتمالية حتى في الفيزياء الكلاسيكية؛ لأنك لن تستطيعي أبدًا حساب تأثير كل فراشة مفردة قد تؤثر في الطقس.

---

[4] ذم آينشتاين الطبيعة الاحتمالية الكمية بأكثر من صياغة، لكن يعود أصل هذه الصياغة إلى رسالته لماكس بورن في العام 1926، التي كتب فيها: «تقدم لنا النظرية الشيء الكثير، لكنها لا تكاد تقربنا من سر [القديم]. أنا شخصيًا مقتنع بأنه لا يرمي النرد».

- فراشات الفوضى الغبية.

- أؤكد مرة أخرى أن الاحتمالية في الفيزياء الكمية أمر مختلف تمامًا. سبب وجود الاحتمالية في الفيزياء الكلاسيكية هو قصور عملي. ولو استطعتِ -بمعجزة ما- متابعة كل فراشة في العالم، فإنك ستتنبئين بالطقس بيقين، لبعض الوقت في الأقل. وهذا غير ممكن في الفيزياء الكمية.

- أتعني أن الفراشات محكومة بمبدأ الريبة فلا نعرف أين هي؟

- جزئيًا وحسب، الأمر أعمق. حسب ميكانيك الكم، حتى إن أجريتِ ذات التجربة مرتين عند ذات الظروف تمامًا -حد تطابق حركات أجنحة كل فراشات العالم- فإنك ستظلين غير قادرة على التنبؤ بنتاجات التجربة الثانية على نحوٍ قاطع، يمكنك حساب احتمالية الحصول على نتاجات مختلفة وحسب. إن تجربتين متطابقتين تمامًا تستطيعان بل وسوف تنتجان نتاجات مختلفة.

- أوه! أتعلم، هذا عويص حقًا. ربما لست بتلك السخافة في النهاية.

- شكرًا لثقتك.

• • •

أما آخر مبدأ نذكره للنظرية الكمية فهو فكرة القياس. وهي هنا عملية مؤثرة[5]. بمعنى: يخلق فعلُ القياسِ المجرد لشيءٍ الواقعَ الذي نرصده[6].

دعيني أضرب لك مثلًا لتبيين الأمر: تخيلي وجود بسكويتة في أحد صندوقين، وكلاهما مغلق وعازل للصوت ومفرغ من الهواء، لئلا تسمعي أو تشمي ما بداخله. ليس لك سبيل لمعرفة الصندوق الذي فيه البسكويتة إلا بفتح أحدهما.

---

[5] تسمى عملية فعالة أو نشطة، لكني أرى ترجمتها إلى المؤثرة أبلغ.

[6] بلغ التطرف بفيرنر هايزنبيرغ حد قوله إن النتاجات من التجارب هي الواقع الوحيد، وألا معنى في الحديث عن أين كان الإلكترون أو ماذا كان يفعل بين عمليات القياس.

سنحتاج إن أردنا وصف هذه الحالة بطريقة كمية إلى كتابة دالة موجية ذات جزئين، يصف الجزء الأول منها احتمالية إيجاد البسكويتة في الصندوق الأيسر، ويصف الآخر احتمالية إيجادها في الصندوق الأيمن. وذلك عبر جمع الدوال الموجية لكون البسكويتة في الصندوق إلى اليمين وحسب، ولكونها في الصندوق إلى اليسار وحسب. تمامًا كما فعلنا في الفصل السابق عندما أعددنا حزمة موجية عبر جمع حالات الأرنب المختلفة (صفحة 59).

تخيلي الآن أنك فتحتِ أحد الصندوقين ووجدتِ البسكويتة (لنقل في الصندوق الأيسر)، ثم أغلقته مجددًا. ما زال لديك بسكويتة وصندوقان لكنك قست موضع البسكويتة، فكيف باتت الدالة الموجية تبدو؟

إجابة أقول إن الدالة باتت بجزء واحد، هو ذلك الذي يصف البسكويتة في الصندوق الأيسر، لأنك أصبحتِ تعلمين موضعها. وعندما تفتحين الصناديق مرة أخرى فإن هناك احتمالية لوجود البسكويتة في الصندوق الأيسر قدرها 100% واحتمالية لوجودها في الصندوق الأيمن قدرها 0%. لقد اختفى الجزء الآخر الذي يصف احتمالية وجود البسكويتة إلى اليمين عندما فتحتِ الصناديق، بسبب عملية القياس.

تخلصي الآن من هذه الصناديق وخذي صندوقين آخرين مجهزين بذات الطريقة، وستكون لديك دالة موجية ذات جزئين من جديد. هذه المرة، لن تكون نتيجة فتح الصندوق الأيسر ذاتها بالضرورة. إذ ربما تجدين البسكويتة في الصندوق الأيمن. وإن وجدتها في الأيمن ثم أغلقتِ الصناديق، ستجدين البسكويتة في الصندوق الأيمن في كل مرة تعيدين فتح هذه الصناديق. أي إنك انتقلتِ من دالة موجية بجزئين إلى دالة موجية بجزء واحد.

قد تقولين: ما الجلل بخصوص هذا؟ أليست هذه آلية الاحتمالية من الأساس؟ إذ كانت البسكويتة في التجربة الأولى في الصندوق الأيسر منذ

البداية لكننا لم نعلم وحسب، وفي الثانية كانت في الصندوق الأيمن. ستضيفين إن حالة البسكويتة لم تتغير، وإنما معرفتنا بموقعها هو الذي تغير.

لكن الاحتمالية الكمية ليست هكذا. فلا يعني امتلاكنا لدالة موجية ذات جزئين (حالة تراكب كمي) أن الشيء في إحدى حالتين، بل يعني أنه في كلا الحالتين في ذات الوقت. أي إن البسكويتة لم تكن في أحد الصندوقين، بل كانت في كليهما في ذات الوقت، حتى لحظة فتحنا الصندوقين وإيجادها في واحد منهما.

• • •

- لماذا أؤمن بهذا؟ إنه شديد الغرابة!

- يمكننا برهنة السمات الغريبة للنظرية الكمية مثل هذه بتجربة تسمى الممحاة الكمية.

- عظيم! أحب هذا! لنمحو بعض القطط!

- إنها ليست للأجسام الكبروية. بل تستعمل الضوء المستقطب، الذي يجب أن أشرحه أولًا.

- تعسًا لحظي... لماذا لا نستطيع محو الأشياء وحسب!

- سأختصر في الأمر قدر الإمكان، لكنه مهم جدًا. فالضوء المستقطب هو أفضل نظام يوفر أمثلة جلية للتأثيرات الكمية. وسنحتاج إليه في هذا الفصل والفصلين السابع والثامن.

- حسن جدًا. ما دمت سأمحو الأشياء لاحقًا.

- سننظر فيما نستطيع فعله.

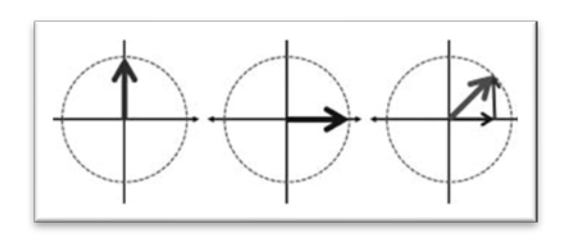
التراكب والاستقطاب: نظام نموذجي

نستطيع إثبات حالة التراكب وبرهنة تأثير القياس بتوظيف استقطاب الضوء. الفوتونات المستقطبة مفيدة جدًا في اختبار تنبؤات ميكانيك الكم، وسيتكرر ذكرها في الفصول اللاحقة، لذا لنأخذ بعض الوقت في الحديث عن استقطاب الضوء، النابع من سلوكه الموجي.

تتميز الموجات (مثل شعاع الضوء) بخمس خصائص. تحدثنا حتى اللحظة عن أربع منها، هي: الطول الموجي (المسافة بين قمتين في نمط الموجة)، والتردد (عدد المرات التي تهتز فيها الموجة في الثانية في نقطة ما)، والسعة (المسافة بين القمة والقاع)، والاتجاه الذي تتحرك فيه الموجة. الخصيصة الخامسة هي الاستقطاب، وهو الاتجاه الذي تهتز فيه الموجة. مثلًا، قد يحاول مالك كلبة غير صبور أن يجذب انتباهها بهز الحبل المقود الذي يربطها إلى أعلى وأسفل، وهذا ينتج موجة مستقطبة عموديًا في الحبل؛ أو يهز الحبل جانبيًا (يمينًا ويسارًا)، وهذا ينتج موجة مستقطبة أفقيًا.

وكما الحبل المهتز، لموجة الضوء الكلاسيكية اتجاه اهتزاز معين. دائمًا ما يكون هذا الاهتزاز بزاوية عمودية على اتجاه الحركة، لكنه يكون عموديًا عليها من أي اتجاه (مثلًا إلى اليمين من اتجاه الموجة، أو اليسار، أو الأعلى أو الأسفل).

عادة ما يمثل الفيزيائيون حالة الاستقطاب لشعاع الضوء بسهم صغير يشير إلى اتجاه الاهتزاز، مثلًا، يمثل الشعاع المستقطب عموديًا بسهم صغير يشير إلى الأعلى، والمستقطب أفقيًا بسهم صغير يشير إلى اليمين، كما موضح في الرسم في الصفحة التالية.



حالات استقطاب موجة، يسارًا: استقطاب عمودي ممثل بسهم يشير إلى الأعلى. في الوسط: استقطاب أفقي ممثل بسهم يشير إلى اليمين. يمينًا: استقطاب بين الأفقي والعمودي، يمكن التفكير فيه بأنه مجموع متجهين (متجه أفقي ومتجه عمودي).

• • •

- مهلًا، ما هذه الصور مجددًا؟

- تخيلي أنك تقفين خلف شعاع من الضوء وتنظرين إلى اتجاه حركته. سيمثل السهم في الصور اتجاه اهتزاز الموجة. فالسهم إلى الأعلى يعني أنك سترين الموجة تتحرك صعودًا وهبوطًا؛ في حين يعني السهم إلى اليمين أنك سترين الموجة تتحرك جانبيًا.

- إذًا... السهم إلى الأعلى يشبه أن أطارد أرنبًا يقفز، والسهم إلى اليمين يشبه مطاردتي سنجابًا يتحرك على نحو متعرجة؟

- نعم، لا بأس بهذا التشبيه.

- هل الأعلى والأسفل هما الخياران الوحيدان الممكنان؟

- لا، يمكن أن يكون السهم في الاتجاه المعاكس كذلك. مثلًا فإن سهمًا يشير إلى اليسار يعني أن الموجة تتحرك جانبيًا، لكنها ليست بذات طور الموجة التي يشير سهمها إلى اليمين.

- تعني أن السهم إلى اليمين هو سنجاب يتحرك على نحو متعرج، لكنه يميل يمينًا ثم يسارًا، وإن كان السهم إلى اليسار فإنه يميل يسارًا ثم يمينًا.

- نعم، إن كنت مصرة على توظيف الطرائد في أمثلتك.

- أحب الطرائد!

يمكن أن يكون استقطاب الموجة عموديًا أو أفقيًا، أو في أي زاوية بينية. نفهم الزوايا البينية بالتفكير أنها متكونة من جزء أفقي وآخر عمودي، كما يظهر في الرسم أعلاه. كل جزء منهما أقل في الشدة (أقل سعةً كما مبين بطول السهمين في الرسم) من الموجة الكلية لكنهما يتراكبان في بعض الزوايا لينتجا ذات الشدة النهائية. يمكنك التفكير في هذا الجمع بأنه مجموعة خطوات، بذات الطريقة التي نستطيع عبرها التحرك إلى نقطة معينة إما بقطع ثلاث خطوات شرقًا تليها أربع شمالًا، وإما بقطع خمس خطوات بزاوية 37° إلى الشمال الشرقي.

• • •

- هذا يعني أن الزاوية البينية هي مثل أرنب يتحرك على نحو متعرج ويقفز في ذات الوقت؟

- نعم، هذا صحيح.

- أو سنجاب يقفز وهو يتحرك على نحو متعرج.

- ألا يكفي أمثلة عن الطرائد؟

- ما أنكدَك.

• • •

من المفيد التفكير في الاستقطاب البيني كمجموع متجه عمودي وآخر أفقي، فهو يسهل فهم ما يحدث حين يصادف الضوء فلتر استقطاب (مُستَقطِبًا). فلاتر الاستقطاب هي أدوات تتيح للضوء المُستَقطَب بزاوية معينة (عمودية مثلًا) العبور من خلاله، وتمتص الضوء المستقطب بزاوية 90° عن الزاوية الأولى (المسموح بعبورها). يمكنك فهم ذلك بتخيل كلبة مربوطة بحبل، مرت عبر سياج وتدي[7] فصار بينها وبين مالكها سياج يمر الحبل عبره. إن هز المالك الحبل عموديًا فإن الموجة

[7] السور الأمريكي التقليدي، الخشبي الأبيض عادةً، الذي يوضع في الحدائق... لا أعلم كيف أصفه أكثر!

ستنتقل عبر السياج، لكنه إن هزه جانبيًا فإن ألواح السياج ستحجب الموجة.

حين يصدم ضوءٌ مستقطب بدرجة بينية فلترَ استقطاب عمودي، لن يمر من موجة الضوء غير الجزء العمودي. هذا يخفض شدة الضوء بدرجة تعتمد على الزاوية. إذ يمر معظم الضوء إن كان مستقطَبًا بدرجات صغيرة، مثلًا في زاوية 30° عن المحور العمودي، يمر ثلاثة أرباعه (تساوي شدة الضوء الخارج من الفلتر ¾ من شدة الضوء الداخل)؛ في حين يُحجب معظم الضوء إن كان مستقطبًا بدرجات أكبر، أما في زاوية 60° سيحجب ثلاثة أرباعه (تساوي شدة الضوء الخارج ¼ من شدة الضوء الداخل). أما إن كان مستقطبًا بزاوية 45° -وهي زاوية وسطية بين الاتجاه العمودي والأفقي- فإن نصف الضوء تمامًا سيمر عبر الفلتر.

يكون الضوء الخارج من فلتر الاستقطاب مستقطَبًا بزاوية تعتمد على زاوية الفلتر، بغض النظر عن حالة الضوء قبل الدخول. ولهذا تسمى فلاتر الاستقطاب بالمُستَقطِبات، إذ سيكون الضوءُ المار عبر فلتر موجه عموديًا (عبر مستقطب عمودي) مستقطبًا عموديًا سواء كان مستقطبًا عموديًا قبل دخوله أو في زاوية بينية. أي إن استقطاب موجة الضوء الخارجة سيكون واحدًا، رغم أن كمية الضوء ستختلف. وتذكر أن كل الضوء الخارج من فلتر استقطاب عموديٍ يستطيع المرور عبر أي فلتر عمودي آخر دون خسائر، وأنه سيحجب كليًا إن صدم فلتر استقطاب أفقي.

• • •

- ما فائدة كل ذلك؟

- علاوة على إثبات الفيزياء الكمية؟ الكثير. استقطاب الضوء شيء مفيد جدًا. مثلًا، تَستخدمُ الشاشات الرقمية في الساعات والهواتف النقالة وأجهزة التلفاز مستقطِبًا أمام مصدر الضوء لتغيير كمية الضوء المارة. كذلك تستخدم المستقطبات لصنع النظارات الشمسية.

- النظارات الشمسية؟

- نعم، النظارات التي أضعها حين آخذك للتنزه هي مستقطبات في الحقيقة. فرغم أن الضوء الصادر من الشمس غير مستقطب، ويحتمل أن يكون عموديًا أو أفقيًا؛ فإنه يميل للاستقطاب حين ينعكس عن الأسطح. مثلًا فإن في الضوء المنعكس عن الطريق الذي نتمشى عليه استقطابًا أفقيًا أكثر من الاستقطاب العمودي، لذا أستطيع حجب معظمه بوضع فلاتر استقطاب عمودي مثل النظارات.

- ما الهدف من ذلك؟ ألا يُصعِّب الرؤية؟

- بل يقلل الوهج في الطريق، ويُسهِّل ملاحظة الأشياء.

- الأشياء... مثل الأرانب في الطريق؟

- نعم، على سبيل المثال.

- هل يمكنك أن تعطيني نظارات شمسية لأرى الأرانب؟

- لا تناسب التي لدي أذنيك، لكن سننظر في الأمر. حاليًا يجب أن أتحدث عن القياس الكمي باستخدام الضوء المستقطب.

- أوه، حسنًا. الفيزياء الكمية. صحيح.

• • •

كيف ينطبق ما سبق على الضوء جسيمًا؟

لقد خصصنا جزءًا غير صغير من الفصل الأول للحديث عن كيف أن شعاع الضوء هو سيل من الفوتونات المنفصلة، وفي ذات الوقت موجة سلسة. لكننا ناقشنا الاستقطاب بمفاهيم كلاسيكية في الصفحات القليلة الأخيرة. فكيف نرى الاستقطاب من زاوية الفيزياء الكمية؟

من السهل وصف كيف يمر جزء من الموجة عبر مستقطِب عند التفكير في الضوء بصفته موجة كلاسيكية. لكن عند التفكير فيه بصفته فوتونات فإن المستقطِب سيكون إما حاجبًا للواحد منها وإما سامحًا. فإما المرور

عبره وإما الامتصاص من قبله. ليس هناك شيء مثل مرور جزء من الفوتون.

نَصِف العلاقة بين الفوتونات والمستقطِبات بالقول إن للفوتون احتمالية مرور تساوي نسبة موجة الضوء التي تمر عبر المستقطِب في النموذج الفيزيائي الكلاسيكي. إن صادف شعاعُ ضوءٍ مُستَقطَب بزاوية 60° من الاتجاه العمودي مستقطِبًا عموديًا، فإن شعاع الضوء المار سيكون بربع الشدة، ما يعني أن فيه ربع الفوتونات الأصلية. لذا لكل فوتون احتمالية مرور تساوي الربع.

يحدد المستقطِب استقطاب كل فوتون يمر من خلاله. مثلًا لن يمر من المستقطِب السابق ذكره (العمودي) غير ربع الفوتونات، لكن هذه الفوتونات الخارجة ستمر جميعًا إن صادفت مستقطِبًا عموديًا مرة أخرى، ولن يمر فوتون منها عبر مستقطب أفقي. لذا فإن حالات الاستقطاب المسموح بها لكل فوتون هي حالة استقطاب أفقي وحالة استقطاب عمودي وحسب، أي إن قياسنا لدرجة استقطاب الفوتون عبر مستقطب لن يكون بغير نتيجتين هي إما عمودي وإما أفقي وليس بدرجة بينية (إما أن يمر الفوتون وإما أن يمتص).

توفر الفوتونات المستقطبة نظامًا مثاليًا للتمعن في المبادئ الجوهرية لميكانيك الكم؛ يمكن وصف كل فوتون بدالة موجية من جزئين، يرتبط كل منها بإحدى الحالتين المسموح بهما من استقطاب عمودي أو أفقي. توفر لك الدالة الموجية احتمالية مرور فوتون عبر مستقطِب، وستكون الفوتونات في إحدى الحالتين المسموح بهما لها بعد أن نجري عملية القياس باستخدام المستقطِب.

يجسد الفوتون الواحد العابر للمستقطِب جميع السمات الأساسية للفيزياء الكمية. لهذا استخدمت الفوتونات المستقطَبة في الكثير من التجارب التي تجسد الظواهر الكمية.

- دعني أتأكد من فهمي للأمر. الفوتون المستقطب بزاوية بينية (بين الأفقية والعمودية) هو في حالة تراكب؟ وإرساله عبر المستقطِب هو مثل قياسه؟

- نعم. تلاحظين باستخدام الفوتونات المستقطبة جميع سمات التراكب الكمي والقياس والدوال الموجية والحالات المسموح بها والاحتمالية.

- ألم تقل إن كل هذه الأشياء تعمل بذات الطريقة عندما تحدثت عن الضوء بصفته موجة كلاسيكية؟

- نعم. النتيجة النهائية هي نفسها في الوصف الكلاسيكي لموجة مستقطبة.

- أين نقطتك إذًا؟ أعني أن مثالك الكبير عن الغرابة الكمية هو شيء ينتج النتاجات نفسها التي تنتجها الفيزياء الكلاسيكية!

- هذا ليس مثالي الكبير. المثال الكبير عن الغرابة الكمية في الجزء التالي.

- اوه. حسنًا، أكمل إذًا.

(إلغاء) قياس فوتون: الممحاة الكمية

تتجلى غرابة التراكب الكمي أحسن تجلٍ في تجربة تسمى الممحاة الكمية. تلخص هذه التجربة الغرائب الكمية لجسيم مفرد في تجربة مفردة، من الازدواجية الموجية الجسيمية وحالات التشابك إلى الطبيعة المؤثرة للقياس. وفهمك لها يعني فهمك للعناصر الأساسية للفيزياء الكمية.

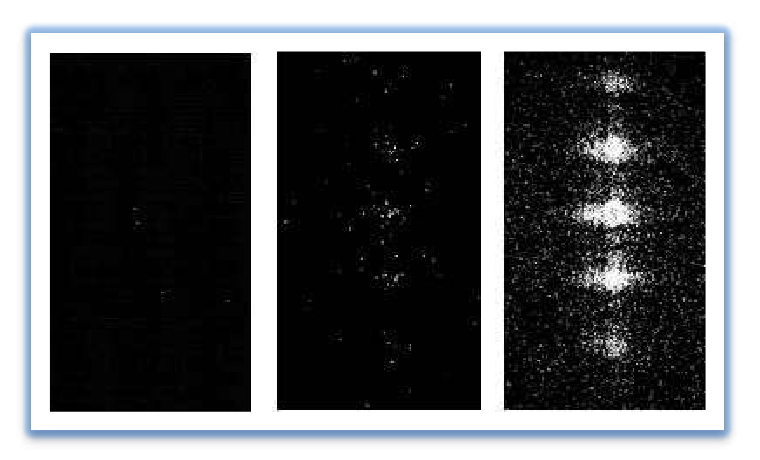
أُجريت الكثير من تجارب الممحاة الكمية على مر السنين[8] لكن أيسرها توظف تجربة الشق المزدوج ليونغ (شرحناها في الصفحة 27). فإن أطلقنا شعاع فوتونات باتجاه شقين ضيقين، سنرى نمط تداخل في الجانب الآخر من الشقين يتشكل من فوتونات مفردة مرصودة في مكان معين (كما مبين في الرسم في الصفحة التالية). نحن نرى هذا النمط فقط لأن الضوء يمر عبر الثقبين في ذات الوقت. وإن أغلقنا أحدهما لاختفى نمط التداخل ورأينا مجرد انتشار واسع للفوتونات، الذي يحدث بسبب الطبيعة الموجية للضوء الذي يعبر من الثقب الوحيد المفتوح.

يشير نمط التداخل الذي نراه إلى أن الفوتونات في حالة تراكب، أي إن للدالة الموجية التي تصف كل فوتون جزئين يصف أحدهما مرور الفوتون من الثقب الأيسر، والآخر مرور الفوتون من الثقب الأيمن. كل فوتون يكون قد مر عبر الشقين في ذات الوقت، والتداخل بين هذين الجزئين هو ما يسبب النمط الذي نراه.

---

[8] حتى إن هناك صفحة في مجلة ساينتفك أميريكان العلمية الإلكترونية (من شهر مارس 2007) تصف تجربة ممحاة كمية يمكن عملها في المنزل باستخدام ليزر وسلك ورقائق قصدير وبضعة أشرطة استقطاب رخيصة الثمن. إليك الرابط:

Slideshow: Do-It-Yourself Quantum Eraser - Scientific American



نمط التداخل المتكون من مرور فوتونات مفردة. من اليسار إلى اليمين: بعد 1/30 ثانية، بعد ثانية، بعد مئة ثانية.

دائمًا ما يظهر نمط التداخل إن كنت تمتلك دالة موجية بجزئين. وإن أغلقنا أحد الثقبين فإن الدالة ستكون بجزء واحد ولن نرى نمط تداخل، لأن التراكب قد تحطم.

• • •

- مهلًا، كنت أعتقد أن التداخل يحدث بين فوتونات مختلفة! بين فوتون يدخل من اليمين وآخر يدخل من اليسار!

- ليس غريبًا أن تعتقدي ذلك، فنحن عادة ما نرسل الكثير من الفوتونات معًا. مع ذلك، نستطيع إثبات أن الحال غير ذلك بإرسال الضوء عبر الفتحتين فوتونًا تلو فوتون.

- أنى للفوتون المنفرد أن يظهر نمط تداخل؟

- إنه لا يظهر. كل فوتون يظهر على الشاشة بشكل نقطة واحدة في مكان ما منها، لكن أين يظهر كل فوتون أمر متروك للعشوائية.

- ها قد عدنا للاحتمالية.

- تمامًا. مكان ظهور الفوتون عشوائي، لكن إن أعدت العملية مرات ومرات وتابعتِ جميع الفوتونات فإنك سترينها تتجمع وتشكل نمط تداخل. بأماكن يحتمل جدًا أن يوجد فيها فوتون، وأماكن لا يحتمل فيها وجوده أبدًا. يُحدَدَ النمطُ الكلي بالتوزيع الاحتمالي الذي ينتج من الدالة الموجية لكل فوتون منفرد يتداخل مع نفسه.

- إذًا، هو جسيم واحد، يمر عبر الثقبين في ذات الوقت، ثم ينتهي في مكان واحد في الطرف الآخر؟

- تمامًا.

- هذا غريب جدًا.

- هكذا هي الفيزياء الكمية.

• • •

لنتخيل بدل إغلاق أحد الثقبين، أننا نغطيهما كليهما بمستقطِبين مختلفين، أحدهما عمودي والآخر أفقي. ولنضع في الثقب الأيسر مستقطِبًا يسمح بمرور الضوء المستقطَب أفقيًا وحسب، ونضع في الثقب الأيمن مستقطِبًا يسمح بمرور الضوء المستقطب عموديًا وحسب. إن أطلقنا ضوءًا مستقطبًا بزاوية 45°، ستكون احتمالية مروره عبر الثقب الأيمن هي 50% واحتمالية مروره عبر الثقب الأيسر هي 50%، أي إننا سنحصل على بعض الضوء من كل ثقب.

يتيح لنا ترتيب المستقطِبات هذا سبيلًا لقياس الثقب الذي مر عبره الضوء، وتفصيله التالي: إن وضعنا مستقطِبًا عموديًا (فلتر استقطاب عمودي) قبل جهاز الرصد فإننا سنرى عبره الضوء الذي مر عبر الثقب الأيمن وحسب (لأن المستقطِب في الثقب الأيمن يمرر الضوء المستقطَب عموديًا وحسب، بعكس الذي في الثقب الآخر)، وإن وضعنا مستقطبًا أفقيًا قبل جهاز الرصد فإننا سنرى الضوء الذي مر من الثقب الأيسر وحسب. لذا يتيح لنا المستقطب الثالث الموضوع قبل الراصد

اكتشاف الثقب الذي مر عبره كل فوتون، كأننا وضعنا راصدًا بجانب الثقب وقسنا الموضع مباشرة.

ماذا سيحدث عندها؟

سنلاحظ أن الضوء الخارج من الثقبين لا يظهر أي نمط تداخل. لأننا بقياس استقطاب الضوء نكون قد قسنا الثقب الذي مر عبره الضوء، وهذا ينقلنا من دالة موجية ذات جزئين (التي تظهر نمط تداخل) إلى دالة موجة بجزء واحد (لا تظهر تداخلًا). يدمر قياسُ الثقب الذي مر عبره الفوتون جزءَ الدالة الموجية الذي يصف مرور الفوتون عبر الثقب الآخر، كما يدمر فتح أحد الصناديق جزءَ احتمالية وجود البسكويتة في الصندوق الآخر.

بل لا نحتاج إلى وضع مستقطب قبل الراصد لتحطيم نمط التداخل، فمجرد وضع المستقطِبين على الثقبين يعني أننا «وسمنا» كل فوتون، ومجرد أننا نستطيع تحديد الثقب الذي مر عبره الفوتون كفيل بتدمير النمط. عودة لمثالنا عن البسكويتة والصندوقين، الأمر أشبه أن يُكتب على الصندوق الذي فيه البسكويتة «بسكويت»، إذ لن نحتاج إلى فتح الصندوق لتدمير تراكب.

إن هذا النمط المختفي غريب جدًا، لكن الأمور تصبح أغرب وأغرب. إذ نستطيع إلغاء القياس بعد أن حدث! وذلك بوضع مستقطب بزاوية 45° بدل المستقطب العمودي أو الأفقي (الذي يوضع قبل الراصد) لنرى الضوء بعد خروجه من الثقبين. سوف يعاود نمط التداخل الظهور إن فعلنا ذلك! السبب أن المستقطب بزاوية 45° يتيح مرور الضوء المستقطب عموديًا أو أفقيًا، كل منهما باحتمالية 50%، أي إن الضوء الخارج منه ربما جاء من الثقب الأيمن ذي المستقطب العمودي وربما الثقب الأيسر ذي المستقطب الأفقي، وربما من كليهما، لا نعلم. أي إن هذا المستقطِب الثالث «يمحو» المعلومة التي اكتسبناها سابقًا من وسم الفوتون، كأن تُزال كتابة «بسكويت» من الصندوق الذي فيه البسكويتة.

يلغي وضع المستقطب الثالث هذا عملية قياسنا السابقة كأننا لم نجرها مطلقًا. ويلغي تدمر الجزء الثاني من الدالة الموجية، فيمكننا رؤية نمط التداخل.

تلخص تجربة الممحاة الكمية كل ما هو غريب بشأن المبادئ الجوهرية لميكانيك الكم؛ يثبت ظهور نمط التداخل حالة التراكب الكمي الممثلة بدخول الفوتون من كلا الثقبين في ذات الوقت. ويثبت اختفاء النمط ومعاودة ظهوره عند وضع المستقطبات الطبيعة المؤثرة للقياس الكمي. إن مجرد إمكانية أن نقيس (نحدد) الثقب الذي مر عبره الجسيم كافية لتغيير نتاجات التجربة كليًا.

ما تراه هو كل ما هناك: تفسير كوبنهاغن

هذه الأفكار الأربعة -الدوال الموجية والحالات المسموح بها والاحتمالية والقياس- هي العناصر الجوهرية للنظرية الكمية. يؤكد نمط التداخل الملاحظ في التجارب باستخدام الفوتونات[9] فعلية حلول الجسيمات الكمية في حالات مختلفة في الوقت نفسه. ويؤكد اختفاء النمط في تجربة الممحاة الكمية ومعاودة ظهوره صدق كون القياس عملية مؤثرة وتحدد ما يحدث في تجارب متعاقبة.

رغم ذلك، لدينا مشكلة تتمثل بعدم وجود آلية رياضية تصف الانتقال من الاحتمالية إلى نتاجات التجربة. نحن نستخدم معادلة شرودنغر لحساب الدوال الموجية للحالات المسموح بها للجسم، ونستخدم الدالة الموجية لحساب التوزيع الاحتمالي؛ لكننا نعجز عن استخدام التوزيع الاحتمالي للتنبؤ بالنتاجات الدقيقة لقياس منفرد. هناك شيء غامض يحدث في أثناء القياس.

«مشكلة القياس» هذه هي منبع التفسيرات المتنافسة لميكانيك الكم، وهي تُجبر الفيزياء على الغدو فلسفة. تشترك جميع التفسيرات في رياضيات حساب احتماليات نتاجات التجارب المكررة، لكنها تختلف في تفسير الانتقال من حالة التراكب الكمي (يكون للدالة الموجية حالتان أو أكثر في ذات الوقت) إلى النتيجة الكلاسيكية لكل قياس (يوجد الجسم في حالة واحدة وحسب).

طوَّر نيلز بور وزملاؤه في معهده في الدنمارك أول تفسير للنظرية الكمية، ولهذا فإنه يعرف بتفسير كوبنهاغن (عاصمة الدنمارك). كان هذا التفسير نهجًا مخصصًا لمشكلة القياس في ميكانيك الكم (وهو يشبه نهج بور

[9] والإلكترونات والذرات والجزيئات...

التقليدي من بعض النواحي[10]).

حاول تفسير كوبنهاغن تجنب مشاكل التراكب والقياس بوضع خط فاصل بين الفيزياء الصغروية والكبروية. فنص على أنَّ الأجسام الصغروية - الفوتونات والإلكترونات والذرات والجزيئات- محكومة بميكانيك الكم، والأجسام الكبروية -الكلاب والفيزيائيين وأجهزة القياس- محكومة بالفيزياء الكلاسيكية. هناك فصل تام بين الاثنين في هذا التفسير، ولن ترى جسمًا كبرويًا يتصرف بطريقة كمية أبدًا.

يتضمن القياس الكمي تفاعلًا بين أدوات القياس الكبروية والأجسام الصغروية، وهذا التفاعل يغير حالة الأجسام الصغروية. الوصف التقليدي لذلك أن الدالة الموجية «تنهار» إلى حالة واحدة. وهذا «الانهيار» هو تغيُّر فعلي للدالة الموجية من حالة كمية منتشرة ذات عدة نتاجات ممكنة إلى حالة ذات قيمة مقاسة واحدة[11].

في أكثر أنواع تفسير كوبنهاغن تطرفًا، لا يتطلب هذا الانهيار أدوات قياس كبروية وحسب، بل مراقبًا واعيًا يلاحظ نتيجة القياس. حسب هذا الكلام فإن شجرةً تسقط في غابة ليست ساقطة في الحقيقة، إلى أن يمر شخص -أو كلبة- ويرصدها وهي ساقطة.

---

[10] كما ذكرنا في الفصل الثاني (الصفحة 63)، تمثلت أول مساهمة كبيرة لبور في الفيزياء بنموذج كمي أولي للهيدروجين. وكان خليطًا ناقصًا من الأفكار الكلاسيكية والكمية بلا مسوِّغ واضح له، لكن نتاجاته صحيحة، وليس من الجلي كيف توصل إليه بور. على أي حال، لقد مهد الطريق للنظرية الكمية الحديثة التي نتكلم عنها في هذا الكتاب.

[11] ترتبط كلمة «انهيار» بتفسير كوبنهاغن والتفسيرات التي تشبهه. هناك مناهج أخرى تعالج مشكلة الإسقاط من الدالة الموجية متعددة العناصر إلى نتيجة القياس المفردة لا تتضمن تغيرًا فيزيائيًا في الدالة الموجية. سننظر في أكثر مثال معروف لهذه التفسيرات «غير الانهيارية» في الفصل الرابع.

- انتظر لحظة، ألا يعني هذا رفض كل فكرة وجود طبيعة فيزيائية متجردة؟

- في أكثر الحالات تطرفًا، نعم. ولعل فيرنر هايزنبيرغ كان من أشد أنصار هذا التفسير تطرفًا، فقد أصر على خطأ أن نتحدث عن الإلكترونات كما لو أن لها حقيقة منفصلة. الشيء الوحيد الذي أمكن الحديث عنه حقًا في نظره هو نتاجات قياس تجارب معينة. كان يرفض تمامًا فكرة النقاش بشأن ما تفعله الإلكترونات في المدة بين القياسات.

- هذا متطرف جدًا. لا أعتقد أني أحبه.

- لست الوحيدة، صدقيني.

• • •

يسبب تفسير كوبنهاغن الكثير من المشاكل، منها عدم وجود مسوّغ مقنع للفصل المطلق بين الفيزياء الصغروية والكبروية. فكما رأينا، ومع أنَّ كلما كبرت الأجسام وتعقدت صعُب رصد الظواهر الكمية، فإن من الممكن ملاحظة سلوك موجي في جزيئات كبيرة نسبيًا. لذا يجب أن يمكن وصف الأجسام الكبروية بالقواعد والدوال الموجية الكمية.

أيضًا، من تلك المشاكل مسألة تحديد ما أو من يمكن عَدُّه راصدًا يسبب انهيار الدالة الموجية. إذ إن وجوب وجود شخص يرصد نتاجات عملية القياس حتى يمكن عدها قياسًا، يضفي جودة غامضة على «الوعي»، وهذا لا يناسب الفيزيائيين.

بل إن فكرة «الانهيار» نفسها تبدو مشكلة. فلا توجد معادلة رياضية تصفه. ورغم إمكانية استخدام معادلة شرودنغر لوصف تغيرات الدالة الموجية بين القياسات، فليست لدينا طريقة لوصف عملية «الانهيار» نفسها. كل ما نستطيع فعله اختيار نتيجة وإعادة التجربة بدالة موجية جديدة بعد القياس. يرى العديد من الفيزيائيين هذا أكثر سحرية من اللازم.

يتمثل أفضل توضيح لمشاكل تفسير كوبنهاغن في التجربة الفكرية المشهورة: قطة شرودنغر، والتجربة الفكرية التي تبعتها: صديق ويغنر.

كما آينشتاين، عانى شرودنغر مشاكل فلسفية عميقة في تفسيرات ميكانيك الكم وبات محبطًا من النظرية بأكملها على الرغم من دوره المهم في تطويرها. تمثل قطة شرودنغر، المشهورة أكثر من معادلته، تجربة فكرية شيطانية حاول شرودنغر من خلالها توضيح لا منطقية تفسير كوبنهاغن. لقد تخيل قطة في صندوق مقفل وبجانبها ذرة مشعة احتمالية اضمحلالها في غضون ساعة تساوي 50%، مع جهاز سيحرر غازًا سامًا يقتل القطة إن اضمحلت الذرة. وسأل: ما حالة القطة بعد انقضاء الساعة؟

كما أشار شرودنغر، ستكون الدالة الموجية التي تصف القطة ذات جزئين متساويين هما «حية» و«ميتة» وفقًا لتفسير كوبنهاغن، وهذا سيستمر إلى أن يفتح القائم على التجربة الصندوق، عندها ستنهار الدالة الموجية إلى أحد الاحتمالين وحسب (ميتة أو حية)[12]. يبدو ذلك لغوًا فارغًا، ففكرة أن تكون القطة حية وميتة في ذات الوقت غريبة. لكن يظهر أن ذلك هو ما يحصل للفوتونات!

---

[12] أو كما يصفها تيري براتشيت في روايته لوردات وسيدات، وهو يقصد قطة سيئة: «عمليًا، قد تكون قطة محبوسة في صندوق حية أو ميتة. لن تعرف حتى تنظر. في الحقيقة، إن مجرد فعل فتح الصندوق سيحدد حالة القطة، لكن هناك ثلاث حالات محددة يمكن أن تتواجد فيها، هي: حية، وميتة، وغاضبة جدًا».

يبدو أن تفسير كوبنهاغن يقول بعدم وجود واقع فيزيائي إلى أن يقاس (يرصد)، وهذا بحد ذاته يسبب مشاكل فلسفية. وضح يوجين ويغنر ذلك بإضافة طبقة أخرى إلى تجربة القطة، فتخيل أن تلك التجربة أجراها صديقه، وأخبره بالنتاجات لاحقًا. يسألنا ويغنر: متى انهارت الدالة الموجية؟ عندما فتح صديقه الصندوق أم عندما سمع هو بالخبر؟ بصيغة أخرى، أحقا سقطت شجرة في الغابة قبل أن تخبرك كلبتك أنها باتت على الأرض؟

إجابات تفسير كوبنهاغن عن هذه الأسئلة ليست مقنعة فلسفيًا.

في حين تنجز ميكانيك الكم عملًا رائعًا في وصف سلوك الأجسام الصغروية ومجموعات الأجسام، يظل العالم الذي نراه يبدو كلاسيكيًا بتعنت وعناد. إن شيئًا غامضًا يحدث في الانتقال من العالم الغريب للأجسام الكمية إلى العالم الأكبر كثيرًا للأجسام المألوفة. يرى الفيزيائيون إصرار نهج كوبنهاغن على التقسيم التام بين العالم الكبروي والصغروي تفاديًا للسؤال وحسب، فهو يجهر بما يحدث، لكنه يخافت بالسبب.

ما زالت أفضل طريقة للتعاطي مع موضوع الانتقال بين الكمية والكلاسيكية محور بحث ونقاش. ربما تقود النظريات المستقبلية إلى فهم تفصيلي لما يحدث حقًا عندما نقيس جسمًا كميًا. وليس لدينا حتى ذلك الوقت إلا الاعتقاد بإحدى التفسيرات المختلفة لميكانيك الكم.

• • •

- لا أعتقد أني أحب هذا التفسير، إنه أناني جدًا! أليس كذلك؟

- لست الوحيدة. لا يوجد الكثير من الفيزيائيين السعيدين بتفسير كوبنهاغن هذه الأيام.

- وما التفسير الذي تفضله أنت؟

- أنا؟ أنا أميل لتفسير «اِخرس واحسب». وهو ينسب أحيانًا لريتشارد

فاينمان[13] لكن الفكرة هي تجنب التفكير في الأمر وحسب. وهب لنا ميكانيك الكم أدوات رائعة لحساب نتاجات التجارب، وربما من الأفضل استخدامها وترك التساؤل عما يحدث في أثناء القياس للفلاسفة.

- لا أعتقد أني أحب هذا أيضًا. يصعب استخدام الحاسبة بما لدي من مخالب.

- هناك شتى التفسيرات؛ منها تفسير العوالم المتعددة، وتفسير لامحلية ميكانيك الكم لديفيد بوم، وشيء يسمى التفسير الانتقالي (تفسير المعاملات). تكاد توجد تفسيرات للنظرية بعدد الناس الذين تعمقوا فيها.

- أحب تفسير العوالم المتعددة، يجدر بك الحديث عنه!

- فكرة جيدة. وهو الفصل التالي.

---

[13] ينسب لفاينمان كل قول ذكي لفيزيائي في النصف الثاني من القرن العشرين. رغم ذلك من غير المحتمل أن تكون «اخرس واحسب» قولًا لفاينمان. يبدو أنها ذكرت لأول مرة في عمود ديفيد ميرمين في دورية فيزياء اليوم (في الصفحة الرابعة من إصدار أبريل/ نيسان 1989)، إذ ذكر ذلك بنفسه في الصفحة العاشرة من إصدار مارس/ آذار 2004.

الفصل الرابع

عوالم كثيرة؛ مقرمشات كثيرة: تفسير العوالم المتعددة

فجأة وأنا خلف الحاسوب أكتب، صدمت إيمي قدمي! نظرت إليها فكانت تشم الأرض تحتي باهتمام.

- ماذا تفعلين عندك؟

- أبحث عن قطعة لحم. [هزت ذيلها توقًا]

- لا أظن أن هناك قطعة لحم في الأسفل. لم آكل شريحة لحم قرب الحاسوب قط، وقطعًا لم أسقط بعضها على الأرض.

- لقد فعلت في كون ما. [مستمرة بالشم]

- حسنًا، أي نظرية سخيفة جاء بها عقلك الكلبي التافه هذه المرة؟

- أجبني أولًا، أليس من الممكن أن تأكل شريحة لحم قرب الحاسوب؟

- أنا آكلها نعم، وأحيانًا آكل قرب الحاسوب، لذا نعم، ممكن.

- ولو كنت متناولًا شريحة لحم قرب الحاسوب، من المرجح أن تسقط بعضها على الأرض.

- لست واثقًا...

- صدقًا يا صاح! لقد رأيتك تأكل... [نعم تناديني الكلبة صاح، ربما تكون هناك بعض دروس الطاعة في المستقبل]

- لا بأس، سنتيح هذه الاحتمالية.

- النتيجة أنك ربما أسقطت قطعة من شريحة اللحم على الأرض. وطبقًا لتفسير العوالم المتعددة لميكانيك الكم الذي وضعه إيفرت، ذلك يعني أنك أسقطتها على الأرض بالفعل. لذا ليس عليَّ إلا إيجادها.

- عمليًا، ما يقوله تفسير العوالم المتعددة هو إن هناك فرعًا من الدالة الموجية المتطورة وحدويًا للكون حيث أسقطت قطعة لحم على الأرض.

- مم... صحيح. على أي حال، أنا فقط بحاجة إلى إيجاد تلك التي قلتها.

- لكن المشكلة أننا نتسلم فرعًا واحدًا من الدالة الموجية.

- ربما أنت تتسلم فرعًا واحدًا وحسب. لكن لي أنف جيد جدًا. أستطيع شم ما في الأبعاد الأخرى. إنها مليئة بالسناجب الشريرة. ذات العثنون.

- هذا مسلسل ستار تريك وليس علمًا، علاوة على أن الأبعاد الأخرى شيء مختلف تمامًا. في تفسير العوالم المتعددة: بمجرد أن يحصل فك ترابط كافٍ بين فروع الدالة الموجية فلا يمكن التداخل بين الأجزاء المختلفة، فإن تلك الفروع تصبح أكوانًا منفصلة يتعذر الوصول إليها.

- ماذا تعني بفك الترابط؟

- لنقل إن لدي شريحة لحم هنا -وهي افتراضية وحسب فتوقفي عن هز ذيلك- يقول ميكانيك الكم إنني إن أسقطتها على الأرض ثم التقطتها فمن الممكن أن يحدث تداخل بين الدالة الموجية التي تصف جزء شريحة اللحم الذي سقط وبين الدالة الموجية التي تصف جزء شريحة اللحم الذي لم يسقط. ونحن نحتاج إليهما معًا، لأن إسقاطي لها هو مجرد احتمالية.

- ماذا يعني ذلك؟

- لست واثقًا من كيف سيبدو ذلك. مغزى الكلام أن شريحة اللحم دائمة التفاعل وبيئتها من هواء ومكتب وأرض...

- وكلبة!

- وهذه التفاعلات عشوائية في أساسها وغير مقاسة. وهي تؤدي إلى تغيرات في الدوال الموجية لأجزاء شريحة اللحم المختلفة. تُصعِّب هذه التغيرات تداخلَ الدوال الموجية مع بعضها حتى تستحيل. تسمى هذه العملية بفك الترابط، وهي تحدث بسرعة كبيرة.

قالت وعلى محياها علامات الأمل: سريعة لأي درجة؟

- الأمر يعتمد على الموقف. ربما أقل من 10^{-30} ثانية.

- اوه، هذا سريع. [علتها علامات اليأس]

- نعم. ولن يمكن تفاعل الدوال الموجية فيما بينها بمجرد أن يحدث فك الترابط. هذا يعني، مبدئيًا، أن الفروع المختلفة تصبح أكوانًا منفصلة معزولة عن بعضها بالكامل. وما يحدث في تلك «الأكوان» ليس له أي تأثير فيما يجري في كوننا.

- لماذا لا نرى غير فرع واحد من هذا التي تقوله؟

- هذا هو السؤال المهم. الذي لا يعلم أحد جوابه. يظن البعضُ أن ذلك يعني أن ميكانيك الكم ناقصة في جوهرها، ويوجد حاليًا علماء كثر يبحثون في أسس النظرية الكمية وتفسيراتها. المهم هنا أنك لن تجدي قطعة لحم تحت طاولتي في هذا الكون، لذا اخرجي من تحتها رجاءً.

- اوه، حسنًا. [خرجت مطأطأة رأسها خافضة ذيلها]

- انظري إلى الجانب المشرق. الكون الذي فيه نسخة مني أسقطت قطعة من شريحة اللحم، فيه نسخة منك كذلك.

- حقًا؟ [رافعة رأسها]

- بالطبع. وأنتِ صيادة ماهرة، لذا أرجح أنك أخذتِ القطعة قبل أن ألتقطها!

- حقًا؟ [بدأت تهز ذيلها]

- بالتأكيد. في الكون الذي أسقطت فيه قطعة لحم، تكونين قد أكلتِ قطعة لحم.

بدأ ذيلها يهتز بشدة وقالت: أحب اللحم!

- أعرف أنك تحبين.

حفظت المستند الذي كنت أحرره في الحاسوب وقلت لها: ما رأيك في أن

نتمشى؟

- خطة جيدة!

وسارعتْ بنزول السلم بكركبة نحو المقود والباب الخلفي.

• • •

لم يحب تفسير كوبنهاغن الذي ذكرناه سابقًا غير قلة من الفيزيائيين، واقتُرحت عوضًا عنه بدائل كثيرة، يهدف كل منها لإيجاد طريقة ملائمة للتعامل مع مشكلة القياس الكمي. يعرف أشهرها بتفسير العوالم المتعددة، وهو الأكثر شيوعًا في الثقافة الشعبية إن لم يكن بين الفيزيائيين كذلك، بفضل تنبؤه بأكوان بديلة شبه لا نهائية تجري فيها الأحداث بطريقة تختلف عن مجراها الذي نراه. إنه فكرة خيال علمي رائعة، ظهرت في الكتب والأفلام وحلقة ستار تريك الشهيرة التي صورت سبوك الشرير بعثنون (سكسوكة).

سنتحدث في هذا الفصل عن تفسير العوالم المتعددة، وكيف يحل بعض المشاكل التي يثيرها تفسير كوبنهاغن. سنتحدث أيضًا عن العملية الفيزيائية المعروفة بفك الترابط، والتي تَحجب فيها تفاعلاتٌ متقلبة مع البيئة تأثيراتِ التداخل بين أجزاء الدالة الموجية المختلفة. عملية فك الترابط أساسية للفهم الحديث لميكانيك الكم، ولعلها العنصر الضروري لفهم الانتقال بين العالم الصغروي للفيزياء الكمية والعالم الكبروي للأجسام الكلاسيكية.

ثم يحدث قياس: مشاكل تفسير كوبنهاغن

إن غياب طريقة رياضية لوصف ما يحدث عند قياس كمية ما هو من أكثر عناصر تفسير كوبنهاغن تكديرًا (للفيزيائيين في الأقل). على الرغم من أن معادلة شرودنغر تتيح لنا حساب ما يحدث للدالة الموجية بين القياسات، فإن تفسير كوبنهاغن يقول إن الفيزياء الطبيعية تتوقف في لحظة القياس، ويحدث شيء ما ينتقي النتيجة بطريقة لا تخضع لأي معادلة معروفة.

يتمثل هدف الفيزياء النظرية الحديثة الأساسي بإيجاد وصف رياضي واحد متسق للعالم، لذا تُشكِل على الفيزيائيين طبيعة تفسير كوبنهاغن المخصصة ذات التقسيم الاعتباطي بين الفيزياء الصغروية والكبروية، علاوة على «انهيار الدالة الموجية» الغامض!

تشبه آلية انهيار الدالة الموجية غير المفسرة تلك كاريكاتيرَ سيدني هاريس الذي يصور فيه عالِمًا يكتب «ثم تحدث معجزة» خطوةً انتقالية بين المعطيات والنتاج. ليس في العلم حيِّز للمعجزات، وانهيار كوبنهاغن يبدو أكثر سحرية من اللازم.

يكتفي معظم الفيزيائيين (خصوصًا من التجريبيين) باستخدام فكرة انهيار الدالة الموجية اختصارا حسابيا، ويهتمون بأعمال التنبؤ وقياس العالم المادي، وهو مجال تنجح فيه النظرية الكمية التقليدية على نحو مبهر. يترك الفيزيائيون، في تفسير «اخرس واحسب» هذا، مسألة إيجاد تفسير منطقي للقياسات الكمية للفلاسفة. ربما نجد نظرية أفضل مستقبلًا، لكن علينا الاستفادة مما لدينا -وهو كثير- حتى ذلك الوقت.

مع ذلك، شكلت طبيعة القياسات مشكلة منذ فجر النظرية الكمية، واختار قلة من الفيزيائيين التفكير الدائم بعمق في هذه المشاكل. اعتقدَ معظمهم أن الافتقار إلى شرح واضح لـ«انهيار» الدالة الموجية يشير إلى وجود عيب جوهري في تفسير كوبنهاغن. لذا دأبوا للبحث عن تفسيرات بديلة.

ما من انهيار: تفسير العوالم المتعددة

في العام 1957، اقترح هيو إيفرت الثالث، طالب الدراسات العليا في جامعة برنستون وقتها، حلًا أخاذًا ببساطته لمشكلة «الانهيار». قال إيفرت بعدم وجود صيغة رياضية تصف انهيار الدالة الموجية لعدم وجود انهيار أساسًا. بل إن الدالة الموجية تتطور دائمًا في كل مكان وفقًا لمعادلة شرودنغر، لكننا لا نرى غير جزء صغير من الدالة الموجية الأكبر للكون.

لفهم هذا أكثر، لنعد إلى مثالنا في الفصل السابق عن الكلبة والبسكويتة في الصندوقين المغلقين. إن كانت لدينا بسكويتة موضوعة في أحد الصندوقين، سيكون تفسير كوبنهاغن التالي: تتكون الدالة الموجية للبسكويتة من جزئين معًا. وهي تتغير مع الزمن وفقًا لمعادلة شرودنغر. عندما نفتح الصندوق وندع الكلبة تنظر فيه فإن الدالة الموجية ستنهار فورًا إلى حالة واحدة فقط من الحالتين (بكون البسكويتة في الصندوق الأيمن وحسب أو الأيسر وحسب). ونستطيع التنبؤ بالتغيرات المستقبلية عبر معادلة شرودنغر بتوظيف الدالة الموجية التي بات لها جزء واحد وحسب.

أما في تفسير إيفرت، فلا يوجد انهيار. إنه التالي: تتكون الدالة الموجية للبسكويتة من جزئين (حالة تراكب)، أحدهما يرتبط بكون البسكويتة في الصندوق الأيمن والآخر بكونها في الأيسر، وحين نفتح الصندوق فإن هذا التراكب لا يتحطم بل يصبح أكبر وحسب (هنا يبدأ اختلافها مع التفسير السابق). لم يعد التراكب محدودًا بأدوات القياس وحسب (الصندوقين) بل بات يشمل الكلبة التي تقيس موضع البسكويتة. وبات الجزء الأول من الدالة الموجية «بسكويتة في الصندوق الأيسر+ كلبة تعرف أن البسكويتة في الصندوق الأيسر»، والثاني «بسكويتة في الصندوق الأيمن+ كلبة تعلم أن البسكويتة في الصندوق الأيمن»؛ وتزداد العملية تعقيدًا مع الزمن. فإن تضمنت الخطوة التالية في التجربة احتمالية أن تأكل الكلبة البسكويتة أو

لا تأكلها (احتمال ضعيف، لكنه ممكن) سوف تحتوي الدالة الموجية على أربعة أجزاء:

كلبة أكلت البسكويتة من الصندوق الأيسر.

كلبة لم تأكل البسكويتة من الصندوق الأيسر.

كلبة أكلت البسكويتة من الصندوق الأيمن.

كلبة لم تأكل البسكويتة من الصندوق الأيمن.

هذه الزيادة في التعقيد أوضح رياضيًا؛ نحن نبدأ بدالة موجية تشمل البسكويتة وحسب، وتتكون من جزئين:

$$\Psi_{total} = |L>_{treat} + |R>_{treat}$$

يمثل ما بين رمز الزاوية والخط العمودي الدوال الموجية لكون البسكويتة في أحد الصندوقين. ثم ندخل الكلبة في المعادلة:

$$\Psi_{total} = |L>_{treat}\ |L>_{dog} + |R>_{treat}\ |R>_{dog}$$

وأخيرًا، ندخل قرار أكلها للبسكويتة أو تركها:

$$\Psi_{total} = |L>_{treat}\ |L>_{dog}\ |eat> + |L>_{treat}\ |L>_{dog}\ |not> + |R>_{treat}\ |R>_{dog}|eat> + |R>_{treat}\ |R>_{dog}|not>$$

وكما ترى، يكون التعقيد سريع التزايد، لكن تطوره موصوف بمعادلة شرودنغر دائمًا.

• • •

- أتعلم، لا أفهم الكثير من هذه المعادلات.

- ليس من المفترض فهمها بالتفصيل. لقد وضعتها لأصور تعقيد الدالة الموجية المتزايد بشكل أفضل.

- أتقول إنها هنا فقط لتبدو مخيفة؟

- تقريبًا.

- أوه. لقد أحسنت صنعًا.

• • •

لا يبدو تفسير إيفرت تحسينًا لأول وهلة. نعم لقد حل مشكلة الانهيار الغامض، لكن على حساب دالة موجية تتوسع باطراد أسيٍ. ويبدو كأنه يناقض الواقع أول الأمر، فنحن لا نرى أنظمةً في أكثر من حالة معًا. لو كانت كل تلك الأجزاء الإضافية من الدالة الموجية موجودة فعلًا، فلم لا نرى الأشياء في حالات متعددة في ذات الوقت؟

طبقًا لإيفرت، يعود ذلك إلى عدم إمكانية فصل المراقب عن الدالة الموجية؛ فهو مشمول مع بقية النظام -مثل «بسكويتة في الصندوق الأيسر+ كلبة تعرف أنها فيه»- لذا لا نرى غير جزئنا الصغير من الدالة الموجية الكلية.

هذا التفرع في الدالة الموجية هو أصل العشوائية الكمية التي كدرت آينشتاين وغيره: الدالة الموجية تتطور دائمًا بطريقة سلسة ومستمرة لكننا لا نتسلم غير جزء واحد منها في كل مرة، وأي جزء سوف نتسلمه متروك للعشوائية.

توجد نسخ أخرى منا نحن في الفروع الأخرى، تتسلم أجزاء مختلفة من الدالة الموجية (لهذا يسمى هذا التفسير أحيانًا: تفسير العقول المتعددة).

ليس لأي فرع من الفروع التي تعد فلا تحصى أي تأثير ملموس في أحداث فرعنا، والعكس صحيح تمامًا. عمليًا، تعدُّ الفروع الأخرى أكوانًا موازية مستقلة، ولا يمكن بلوغها من كوننا أبدًا. وهذا سبب تسمية النظرية بالعوالم المتعددة؛ الأمر أشبه بتفرع الكون عند كل قياس يحدث، ودوام تفريخه أكوانًا موازية ذات تواريخ مختلفة قليلًا.

تداعي الدالة الموجية: فك الترابط

تسبب هذه الفروع غير المتفاعلة مشكلة كبيرة لتفسير العوالم المتعددة. إذ تؤدي كل الدوال الموجية ذات الجزئين التي نعرفها إلى نوع من التداخل. لذا، لماذا لا نرى تداخلًا دائمًا حولنا إن وجدت كل تلك الأجزاء الإضافية من الدالة الموجية؟ ما الذي يحجب تلك «الأكوان الموازية» عنا؟

إجابة هذين السؤالين كلمتين وحسب: «فك الترابط»، وهي عملية تمنع تفاعل الفروع المختلفة للدالة الموجية فيما بينها. فك الترابط هذا هو نتيجة تفاعلات عشوائية متقلبة بين الأشياء والبيئة الأكبر، تدمر هذه التفاعلات احتمالية التداخل بين فروع دالة الموجة المختلفة، وتجعل العالم المألوف بشكله الكلاسيكي. لا تحدث عملية فك الترابط في تفسير العوالم المتعددة لميكانيك الكم وحسب بل هي عملية فيزيائية حقيقية تتناغم مع أي تفسير[1] مع ذلك فإنها ذات أهمية خاصة لنظرة العوالم المتعددة الحديثة (لهذا يسمى هذا التفسير أحيانًا «التواريخ المتفككة»، إن له أسماء كثيرة كما ترى[2]).

فك الترابط في منتهى الأهمية للنظرة الحديثة إلى ميكانيك الكم وتفسيراته. مع ذلك فإن أشهر الشروح نصف الكلاسيكية له غير وافية ولا دقيقة، وكثيرًا ما تكون دائرية[3]. النظرية الحقيقية لفك الترابط صعبة وعصية على الفهم. مع ذلك فإنها -كما مبدأ الريبة في الفصل الثاني- تستحق مشقة سبر أغوارها؛ لأنها توفر فهمًا أفضل بكثير لطريقة عمل الكون.

---

[1] في الواقع، تشمل كل التفسيرات البديلة لكوبنهاغن فك الترابط جزءًا أساسيًا في عملية القياس.

[2] مثل العوالم المتعددة والتواريخ المتعددة والعقول المتعددة والتواريخ غير المترابطة أو المفككة وصياغة الحالة النسبية ونظرية الدالة الموجية الكونية، وغيرها.

[3] التعريف الدائري هو الحالة التي تحدث عندما يظهر المُعرّف في التعريف، مثل قولنا إن الفلسفة هي النشاط الذي يمارسه الفلاسفة.

سنجري تجربة باستخدام «مقياس التداخل»[4] لفهم هذه العملية، وهو جهاز يتكون من مُنصفي شعاع يقسمان شعاع الضوء بالتساوي. وبضعة مرايا تعكس الأشعة المتفرقة وتجمعها من جديد.

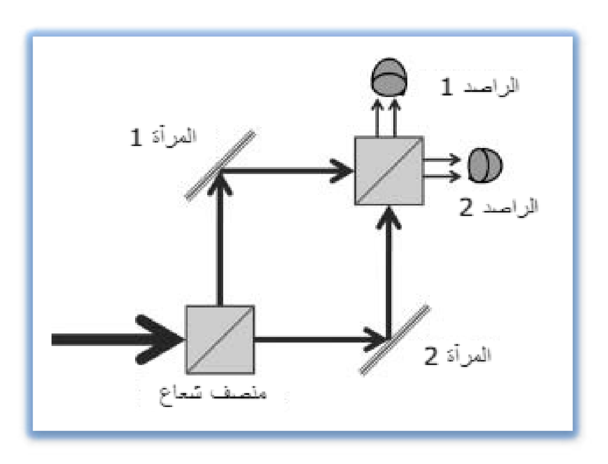
مقياس التداخل هذا شديد الأهمية في الفيزياء، ليس لتوضيح التأثيرات الكمية وحسب، بل لأنه يمثل أساس أكثر كاشفات العالم حساسية للدوران والتعجيل والجاذبية. التي تتيح قياس أصغر القوى في التجارب الفيزيائية، ولها تطبيقات في الملاحة تحت سطح الماء.

يدخل الضوء إلى مقياس التداخل بعد صدمه منصف شعاع، الذي يمرر نصفه بعد أن يعكسه بزاوية 90° ويتيح مرور النصف الآخر دون التأثير فيه. يُفصل هذان الشعاعان عن بعضهما، ثم يقادان بواسطة مرآتين إلى منصف شعاع آخر يُجمَعان فيه. يكون منصف الشعاع الثاني موضوعًا فيسلك الضوء من أحد الشعاعين والضوء من الشعاع الثاني المنعكس ذات الاتجاه، فيتداخلان معًا قبل السقوط على أحد كاشفين.

لعلك تعتقد أن كل كاشف من الكاشفين سيرصد نصف كمية الضوء الداخل تمامًا، معللًا أن كل كاشف سيتسلم ربع الشعاع الأصلي من كل شعاع من الشعاعين (ربع الضوء من الشعاع المنعكس+ ربع الضوء من الشعاع الذي مر دون أن ينعكس). لكن الرياح لا تجري كما تشتهي، إذ يمكن لكل كاشف أن يتسلم كمية ضوء تتراوح بين 0 و100% من شدة الضوء الداخل، لأن الموجات التي سلكت دربين مختلفين ستتداخل فيما بينها؛ كما فعلت الموجات في تجربة الشق المزدوج في الفصل الأول (صفحة 27).

---

[4] يسمى مقياس تداخل ماخ-زيندر تيمنًا بالفيزيائيين الألماني والسويسري اللذين اخترعاه.



مقياس التداخل: يدخل الضوء من اليسار، وينصفه منصف الشعاع في مسارين مختلفين، ثم يجمعهما منصف شعاع آخر بعد أن ينعكسا عن المرآتين. إن قطع شعاع الضوء الذي يصدم المرآة الأولى ذات المسافة التي قطعها الشعاع الذي يصدم المرآة الثانية، فإن التداخل سيسبب سقوط جميع الضوء على الكاشف الأول، وعدم ظهور أي منه على الكاشف الثاني.

إن سلك الشعاعان مسارين متساويين في الطول تمامًا، فإن موجاتهما الضوئية ستهتز عدد الاهتزازات نفسه في طريقها إلى الكاشف الثاني، فتتداخل على نحو بناء منتجةً مناطق مضيئة (سيصدم كل الضوء الداخل إلى مقياس التداخل الكاشف الثاني[5].

أما إن كان أحد المسارين أطول من الآخر بمقدار نصف طول موجة ضوئية، فإن الضوء الذي يمر عبر هذا المسار سيهتز نصف اهتزاز إضافي،

---

[5] يحدث تغير صغير في طور الموجة المنعكسة عن منصف الشعاع، كما لو أن الشعاع المنعكس قد سافر مسافة أطول. بالنتيجة، حين يكون للمسارين طول متساوي، سيكون للموجات التي تصدم الكاشف الثاني ذات الطور فتتداخل لتشكل منطقة مضيئة، في حين سيكون للموجات التي تصدم الكاشف الأول أطوار مختلفة فتتلف بعضها. أما إن كانت الأطوال مختلفة، سيعطي الكاشفان إشارات تكميلية، أي عندما لا يرصد الأول ضوءًا سيرصد الثاني شدة الضوء كاملة، والعكس صحيح.

فتتداخل الموجات الضوئية من الشعاعين على نحوٍ إتلافي، أي إن قمم الموجة المنعكسة من المرآة الأولى ستتراكب مع قيعان الموجة المنعكسة من المرآة الثانية (الموجتان ليستا في ذات الطور) فتلغي الموجتان بعضهما ولا يرصد الكاشف الثاني أي ضوء. وإن زدنا فرق الطول بين المسارين إلى طول موجة كاملة للضوء فإن القمم ستتراكب مع بعضها مجددًا وتنتج مناطق مضيئة كما في أول حالة، وهكذا. وبين هذين التطرفين في فرق الطول (الذي ينتج فرق الطور، ثم كمية الضوء التي نراها) نحصل على كمية بينية من الضوء.

يمكننا رسم نمط تداخل عبر إعادة التجربة مرات عديدة وتغيير طول أحد المسارين قليلًا؛ هذا سينتج نمطًا من مناطق مضيئة ومظلمة متتالية على الكاشف الثاني.

لا تعتمد كمية الضوء التي تصل إلى الكاشف الثاني إلا على الوقت الذي يستغرقه الضوء في قطع كل مسار. يمكن التفكير في الشعاعين المسافرين بأنهما كلبان متماثلان يتحركان حول حي واحد، كل منهما باتجاه مختلف. وهما متفقان سلفًا على أن أول كلب يصل إلى الركن المقابل من الحي يحق له اختيار المسار المتبقي الذي سيسيران فيه. إن كان المساران متساويين في الطول، والكلبان يسيران بذات السرعة فإنها دائمًا سيصلان إلى الركن المقابل معًا. لكن إن كان أحد الدربين أطول من الآخر فإن الذي يقطعه سيصل متأخرًا ويتبع الكلب الآخر لباقي الطريق.

• • •

- مهلًا، ما الكمي بخصوص هذا؟ أنت تتحدث عن الموجات والكلاب وحسب!

- يمكن وصف العملية الأساسية لمقياس التداخل بطريقة كلاسيكية، لكن هذا لن يستمر إن أرسلتِ الشعاع فوتونًا تلو فوتون. فهذا نظام لا يمكن شرحه بغير الفيزياء الكمية.

- ألا تحتاج إلى الكثير من الفوتونات لرؤية نمط التداخل؟

- نعم، لكن يمكنك إنشاء النمط بإعادة التجربة مرات عديدة. إذ تعدين المسارين ليكونا متساويين في الطول، ثم تجرين التجربة ألف مرة، سترين حينها ألف فوتون على أحد الكاشفين. بعد ذلك غيري مكان إحدى المرآتين قليلًا وكرري التجربة ألف مرة أخرى، سترين 700 فوتون على أحد الكاشفين، وهكذا. ستلاحظين باستمرار فعل ذلك مرات ومرات، ذات النمط الذي ينتج من الشعاع المضيء.

- بالطريقة نفسها التي قست بها الدالة الموجية لأرنب في الحديقة الخلفية، عبر تأشير موقعه في كل ليلة عندما كنت أطارده؟

- في الحقيقة، لقد قستِ التوزيع الاحتمالي، وهو مربع الدالة الموجية وليس الدالة نفسها، لكن نعم هذه هي الفكرة الأساسية.

- من المرجح جدًا أن يوجد الأرنب تحت مغذية الطيور، أتعلم ذلك؟

- نعم، لأنه يأكل الحبوب التي تسقط على الأرض. ركزي أرجوك!

- حسنًا.

• • •

بالانتقال إلى الوصف الكمي لعمل مقياس التداخل، والحديث عن عمله بتوظيف فوتونات مفردة ودوال موجية نقول: إن الدالة الموجية للفوتون تتفرع إلى جزئين عند أول منصف شعاع. قد تعتقد -وفقًا للصورة الشائعة من نظرة العوالم المتعددة- أن الكون يتفرع إلى اثنين في هذه اللحظة، لأننا هنا نحصل على الفرع الثاني للدالة الموجية. لكن هذا ليس صحيحًا.

نعم إن للدالة الموجية فرعين، لكنهما ليسا كونين منفصلين في هذه اللحظة. نحن نعلم هذا لأننا نرى نمط تداخل عندما نجمعهما معًا في منصف الشعاع الآخر. بالإضافة إلى أن احتمالية وصول الفوتون إلى الكاشف تتغير كلما غيرنا طول أحد المسارين في مقياس التداخل، ما يشير إلى أن المسارين المنفصلين يؤثران في بعضهما.

يسلك الفوتون المسارين في ذات الوقت، ويتداخل مع نفسه عندما نجمع الفرعين. نستطيع رؤية نمط التداخل هذا لأن لجزئي الدالة الموجية خاصية تسمى الترابط (الاتساق).

الترابط كلمة فضفاضة، لكن حين نقول إن دالتين موجيتين في حالة ترابط فنحن نعني أنهما تتصرفان على أنهما صادرتان من المصدر نفسه[6]. وهما بالفعل صادرتان من المصدر نفسه في تجربة مقياس التداخل، وبنحو أساسي، يمر كل من الجزئين في طريقه عبر مقياس التداخل بذات التفاعلات، لذا يبقيان مترابطين طوال الوقت. العامل الوحيد الذي يحدد ما إن كان التداخل سيكون متفقًا في الطور أو مختلفًا فيه هو فرق الطول بين المسارين.

لجعل فرعي الدالة الموجية كونين منفصلين، علينا تدمير الترابط. بدون الترابط لن يتداخل الجزءان لتشكيل نمط ملحوظ، ولن يمكننا رؤية أي تأثير لمسار في مسار آخر. سيبدو الفوتون كجسيم كلاسيكي في كونين مختلفين، مارًا عبر منصف الشعاع مباشرة في أحد الكونين، ومنعكسًا عنه في الكون الآخر.

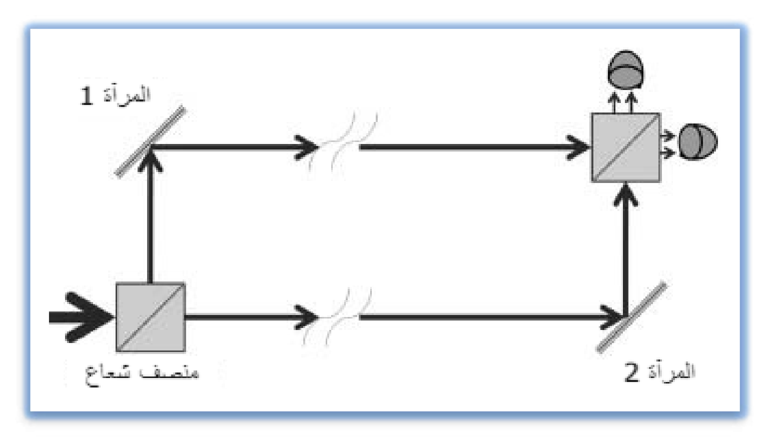
يتحطم الترابط بين فرعي الدالة الموجية عبر التفاعل مع البيئة الأكبر. لفهم ذلك، تخيل أن المسارين في مقياس التداخل طويلان جدا، فيجب على كل شعاع المرور بالكثير من الهواء في طريقه بين منصفي الشعاع.

بالعودة إلى مثالنا عن الكلبين اللذين يتمشيان، يمكن تشبيه مقياس التداخل الأطول بجعل الكلبين المتماثلين يمشيان حول منتزه هايد بارك في اتجاهين متعاكسين. يتيح المسار الأطول وقتًا أكثر لزيادة التشتت (من سناجب لتطارد، وبقايا طعام لتؤكل). حتى لا يعود الكلبان يتحركان بذات

---

[6] هذا تعريف تقريبي جدًا، ولا يصور كل شيء (مثلًا قد لا تكون الموجات الصادرة من طرفي مصدر واحد كبير مترابطة) لكنه يوصل الفكرة الأساسية.

السرعة، فيسرعان أو يبطئان حسب ما يصادفان. لذا لن يعتمد الترتيب الذي يصلان فيه على طول المسار الذي يسلكانه وحسب، بل على ما يصادفان فيه كذلك.



مقياس تداخل بمسافة طويلة بين مفرقي الشعاع.

يحدث ذات الأمر للضوء؛ فبينما يتنقل عبر مقياس التداخل، سيتفاعل وذرات الهواء وجزيئاته أحيانًا. ربما يصادف الضوء الذي يمر عبر مسارٍ منطقةً ذات جزيئات أقل (كثافة واطئة) فيسرع قليلًا، وربما يصادف منطقة أخرى أكثر كثافة فتقل سرعته (سرعة الضوء تعتمد على الوسيط الذي ينتقل فيه، وتزيد كلما قلت كثافة المادة حتى يبلغ أقصى سرعة له في الفراغ). هذه التأثيرات صغيرة جدًا، لكنها تتراكم على طول الطريق كما تتراكم المشتتات على كلب يسير حول هايد بارك.

لا يحدد نمط التداخل بطول المسار وحسب، بل بالتفاعلات مع المحيط كذلك، المتمثل هنا بالهواء الذي يمر الضوء من خلاله.

وكما المشتتات السابق ذكرها، فإن التفاعلات مع المحيط عشوائية في أساسها ومتقلبة، بمعنى أنها تختلف من مكان لآخر، ومن وقت لآخر. لن يجد الكلب طعامًا على أرض ذات المسار كل يوم، ولن يتفاعل الفوتون

والجزيئة في ذات المكان من مقياس التداخل في كل مرة. تغيِّر التفاعلات النمط، وتختلف هذه التغيرات في كل مرة نجري التجربة. والنتيجة النهائية (سواء كانت ضوءًا على الكاشف الثاني أو كلبًا يربح السباق) ستكون عشوائية تمامًا، تحددها عوامل ليست بأيدينا.

لا تعود موجات الضوء من المسارين مترابطة بسبب هذه التفاعلات العشوائية، لذا لا نرى نمط تداخل واضح عندما نجمع الشعاعين معًا. بل نرى عوضًا عن ذلك نمطًا يتغير باستمرار، مغيّرًا موقعه ملايين المرات في الثانية. تصبح المناطق المظلمة والمضيئة ضبابية، مما يمحو النمط. يحدث نفس هذا التأثير عندما نجري التجربة باستخدام فوتونات مفردة؛ فجزئي الدالة الموجية لا يعودان مترابطين. إذ يتحطم النمط حين تتفاعل الفوتونات والمحيط تفاعلات عشوائية ومتقلبة.

تعرف عملية التفاعلات العشوائية المدمرة للتأثيرات الكمية بفك الترابط. لأنها تحطم الترابط بين الأجزاء المختلفة لدالة الفوتون الموجية.

يمنع فك الترابط تأثير الفروع المختلفة من الدالة الموجية في بعضها بطريقة ملحوظة، أي إننا سننتظر عودة الفروع المختلفة مع بعضها وإنتاج نمط تداخل، لكننا لن نراه. التداخل بين الفروع المختلفة عشوائي ولا يمكن ملاحظته بسبب عملية فك الترابط.

• • •

- إذًا، أصبح لدينا الآن فوتونين مختلفين لا يتداخلان؟

- لا، الأمر أعمق من ذلك. ما زلنا بفوتون واحد، لكنه يتمثل بفرعين مختلفين في الدالة الموجية. ولا نرى تداخلًا بينهما بسبب فك الترابط.

- إذًا، هو فوتون واحد لا يتداخل مع نفسه؟

- بل يتداخل ونفسه، لكن تغيّر التفاعلات مع البيئة نمط التداخل في كل مرة. لا نستطيع إعداد نمطٍ من قياسات مختلفة، لأن القياسات دائمًا

تتغير. سيتغير النمط ملايين المرات في الثانية، ومن المحتمل أن تري مناطق مضيئة كما يحتمل أن تري مناطق مظلمة، ما يشوه النمط بأكمله إلى...

- مناطق بينية؟

- تمامًا.

- إذًا، الأمر يشبه محاولتي قياس دالة الأرنب الموجية عبر تأشير موضعه عندما أطارده، لكني أحيانًا أطارد السناجب بدلًا عنه؟

- لن يحدث هذا فرقًا كبيرًا لأن كلا الأرانب والسناجب يميل إلى الوجود تحت مغذية الطيور. الأمر أشبه بمحاولتك قياس دالة الأرنب الموجية عبر تسجيل موقعه كل ليلة، في حين أغير موقع مغذية الطيور كل ليلة.

- أوه. سيكون ذلك لئيمًا. لا تفعل ذلك.

- لست أنوي. إنه مجرد تشبيه لطريقة محو فك الترابط نمط التداخل. صحيح أن كل فوتون يتداخل ونفسه، لكن جزئي الدالة الموجية ليسا مترابطين، لذا لا نستطيع إعداد نمط تداخل من القياسات المكررة.

- لكن كيف نعرف بوجود تداخل إن لم نستطع رؤية نمط! ما الفرق بين جسيم كمي لا ينتج نمط تداخل وجسيم كلاسيكي اعتيادي؟

- هذ هو المغزى تمامًا: لا يوجد فرق. إذ تضمحل التأثيرات الكمية بسبب التفاعلات العشوائية؛ فتكون النتيجة شيئًا لا يبدو كنمط تداخل، رغم وجود تداخل يحدث طوال الوقت. ينتهي بك الأمر ترصدين فوتونًا في نصف المرات، كما لو كان جسيمًا كلاسيكيًا دون خصائص موجية.

تأثير المحيط: فك الترابط والقياس

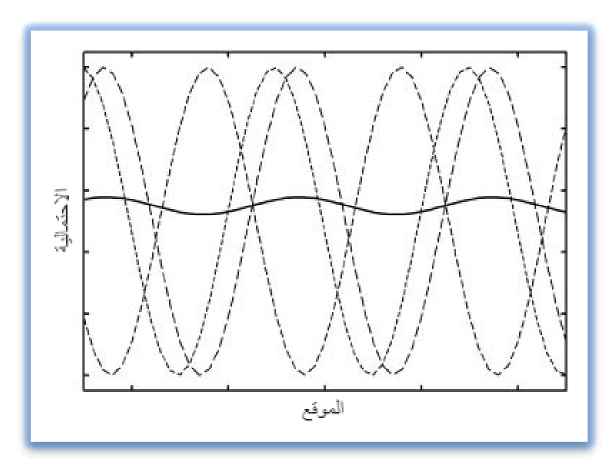
سترى أحيانًا تفسيرات لفك الترابط تصفه أنه نتاج عملية القياس، تفسيرات مثل «إنَّ تفاعل الفوتون وجزيئة الهواء يكافئ قياس موقع الفوتون، والذي يدمر نمط التداخل». هذا التفسير عكس ما يحدث تقريبًا. فليس فك الترابط نتيجة لقياس الفوتون عبر التفاعلات، بل هو نتيجة عدم قياس التفاعلات بين الفوتون والمحيط.

هذه النقطة صعبة الفهم لكنها ضرورية لاستيعاب فك الترابط. عندما نرسل فوتونًا عبر جهاز مقياس التداخل، فإنه سيتداخل مع نفسه طبقًا لدالة موجية تظهر بعض نمط التداخل. وإن أمكننا إرسال آلاف الفوتونات وتحصيل ذات التفاعل في كل مرة، سنستطيع حينها إعادة التجربة مرات ومرات وتتبع نمط تداخل يشبه أول خط متقطع في الرسم في الصفحة التالية.

المشكلة أننا لا نستطيع ضمان حدوث ذات التفاعلات بين الفوتون والمحيط في كل مرة، بأكثر مما نستطيع ضمان أن سائحًا في متنزه هايد بارك سيسقط الطعام في المكان نفسه في كل مرة تخرج فيها كلابنا للتمشي. لذا، سيتداخل الفوتون الثاني المرسل عبر مقياس التداخل مع نفسه وفقًا لدالة موجية مختلفة. وإن استطعنا تكرار هذه التجربة آلاف المرات، سنتتبع نمطًا يشبه الخط المتقطع الثاني في الرسم التالي. كذلك، سيكون للفوتون الثالث المرسل دالة موجية مختلفة، ستنتج نمطًا يشبه الخط المتقطع الثالث، وهكذا.

في النهاية سنحصل على فوتون واحد مرسوم من كل نمط من هذه الأنماط، وآلاف من الفوتونات من الأنماط الأخرى كل منها بقمم في أماكن مختلفة.

يظهر التأثير التراكمي نمطًا يمثل مجموع أنماط تداخل مختلفة كثيرة. وهو ممثل بالخط الغامق في الرسم التالي، والذي لا يكاد يبين تداخلًا.



تظهر الخطوط المتقطعة أنماط التداخل لفوتونات بثلاثة أطوار مختلفة. ويمثل الخط الغامق مجموع عدة أنماط مشابهة، وهو يبين كيف أن معظم نمط التداخل قد أُلغي.

ما علاقة هذا بقياس المحيط؟

حسنًا، حين يتفاعل كل فوتون نرسله مع الهواء، فإنه يسبب تغيّرًا طفيفًا في البيئة المحيطة (يسرع حركة جزيئة هواء أو يبطؤها أو يغير حالتها الداخلية بطريقة ما). ويعتمد التغير في البيئة على نوع التفاعل الحاصل، والذي بدوره يحدد ما يحدث للفوتون.

إن كنا نستطيع تتبع كل شيء حدث للمحيط (الحالة الدقيقة لكل جزيئة هواء في مساري مقياس التداخل) سوف يمكننا استخدام هذه المعلومة لمعرفة ماذا حدث للفوتون، وانتقاء الفوتونات ذات الدوال الموجية التي تنتج ذات الأنماط. لن تكون النتاجات متطابقة إلا لعدد ضئيل من الفوتونات، لكن يمكن إيجادها بإعادة التجربة بما فيه الكفاية (ربما ينتج الفوتون رقم 159 ذات نمط الفوتون الأول، ثم ينتج الفوتون رقم 1022، وبعده الفوتون رقم 5674، وهكذا). إن انتقيت هذه الفوتونات وحسب، ستراها تظهر نمط تداخل، كأن فك الترابط غير موجود.

- إذًا، أستطيع إيجاد الدالة الموجية للأرنب حتى إن كنت تحرك مغذية الطيور كل ليلة؟

- نعم، إن استطعت تتبع موضع مغذية الطيور في كل ليلة.

- لأن من المرجح أن يوجد الأرنب تحتها؟

- تمامًا. إن جمعت مواقع الأرنب المختلفة مع بعضها سيكون الأمر فوضويًا لكن إن انتقيت الحالات التي كانت فيها مغذية الطيور معلقة بشجرة البلوط، ستجدين الأرنب تحتها أغلب الوقت. وإن انتقيت الحالات التي كانت فيها مغذية الطيور بين شجرتي القيقب، ستجدين الأرنب هناك أغلب الوقت، وهكذا.

- حسنًا. لكنك لن تفعل ذلك، صحيح؟

- لن أغضبك بهذا الشكل.

- أترى! لهذا أنت البشري المفضل عندي!

• • •

نرى أن تفسير العوالم المتعددة يزيل مشكلتين كبيرتين يعانيهما تفسير كوبنهاغن. إنه لا يقصي الانهيار الغامض للدالة الموجية وحسب، بل يتخلص من تقسيم كوبنهاغن الاعتباطي بين العالمين الصغروي والكبروي. فالأجسام الكبروية مثل القطط في الصناديق تتبع القواعد الكمية في تفسير العوالم المتعددة، وتظهر تأثيرات التداخل والتراكب، لكننا لا نراها بسبب فك الترابط الحاصل بسبب التفاعل مع البيئة. رغم ذلك، نستطيع إعادة تشكيل الدالة الموجية وتأكيد أن ميكانيك الكم فاعل في جميع المقاييس، في حالة استطعنا متابعة جميع التفاعلات بين القطة وبيئتها.

بالطبع، يستحيل متابعة الحالة الدقيقة لكل الجسيمات حتى في أسهل التجارب العلمية، فما بالك بجميع الجسيمات في الأجسام الكبروية مثل قطعة من شريحة لحم أو كلبة جائعة. لذا تحدث عملية فك الترابط على الدوام، وبسرعة فائقة. وهي موجودة في أي وقت يتفاعل فيه جسم مع البيئة الأكبر، وجميع الأجسام تتفاعل مع بيئتها في كل وقت. وكلما زاد عدد الذرات التي لديك، زادت احتمالية تفاعل النظام والمحيط، وزادت سرعة عملية فك الترابط. تحتوي قطعة من شريحة لحم على قرابة 10^{23} ذرة، لذا ستحدث عملية فك الارتباط بسرعة عالية جدًا، لدرجة أنك لن تلحظ أي تأثيرات كمية[7].

رغم الصعوبة الشديدة في عزل الأجسام الحقيقية عن البيئة بدرجة تتيح رؤية تداخل كمي فإننا نستطيع فعل ذلك. إذ استطاع التجريبيون إظهار التأثيرات الكمية باستخدام عدد صغير من الجسيمات الموضوعة في حجرات فراغية فائقة، غالبًا ما تتضمن مكونات مبردة لدرجات قريبة جدًا من الصفر المطلق.

تضمنت أكبر تجربة من هذا النوع أكثر من مليار إلكترون في حلقة من موصل فائق بدرجة حرارة تزيد عن الصفر المطلق بدرجات قليلة. وضعت الإلكترونات في حالات تراكب كمي تمثل سريانًا في الدائرة مع عقارب الساعة، وسريانًا بعكس عقارب الساعة (مثل كلب يمشي حول هايد بارك باتجاه عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة في ذات الوقت). قد يبدو مليار إلكترون عددًا كبيرًا لكنه صغير جدًا مقارنة بالأجسام الاعتيادية المألوفة. مع ذلك فإن هذا العدد يبين أننا نستطيع رؤية التصرف الكمي للجسيمات الكبيرة إن أعددنا المحيط بدقة كافية.

---

[7] علاوة على حقيقة أن الطول الموجي لقطعة من اللحم تزن عشرة غرامات يقارب 10^{-29} متر، ناقشنا الأمر في الفصل الأول. ما يجعل قياس نمط تداخل قطعة اللحم شبه مستحيل حتى إن حلت مشكلة فك الترابط.

بلوغ الواقع: فك الترابط والتفسيرات

ليست فكرة فك الترابط حكرًا على تفسير العوالم المتعددة بتاتًا. فهي عملية فيزيائية حقيقية تحدث في جميع التفسيرات.

في تفسير كوبنهاغن، يمثل فك الترابط الخطوة الأولى في عملية القياس، فيحدد الحالات التي يحتمل حدوثها. إنه يحول تراكبًا مترابطًا يتكون من حالتين أو أكثر (كلا ألف وباء) إلى مزيج غير مترابط من حالات محددة (إما ألف وإما باء). ثم تسبب آلية أخرى، غير معروفة، انهيار الدالة الموجية إلى إحدى الحالتين الأخيرتين فيظهر النتاج النهائي للقياس.

أما في تفسير العوالم المتعددة، يمنع فك الترابط تفاعل الفروع المختلفة من الدالة الموجية مع بعضها، وكل فرع من الفروع يحتوي على مراقب يرى نتاجات فرعه فقط. في كلا الحالتين، فك الترابط هو خطوة أساسية في الانتقال من التراكب الكمي إلى الواقع الكلاسيكي.

جميع التوقعات الملموسة للنظرية الكمية متطابقة تمامًا، بغض النظر عن التفسير. ومهما كان نوع التفسير الذي تفضله، سوف تستخدم ذات المعادلات لإيجاد الدالة الموجية، والتي بدورها تستخدم لإيجاد الاحتماليات للنتاجات المختلفة الممكنة لأي عملية قياس. ولا توجد تجربة تفرِّق بين تفسير كوبنهاغن وتفسير العوالم المتعددة[8]، لذا إيمانك بأي منهما هو مسألة ذوق لا أكثر. إنهما مجرد طريقتين مختلفتين لتفسير ما يجري في أثناء الانتقال من الاحتماليات التي تتنبأ بها الدالة الموجية إلى نتاجات القياس الفعلي.

---

[8] أو أي من التفسيرات الأخرى. تفسيرات ميكانيك الكم هي نوع من «النظريات الشمولية»، يوفر كل منها شرحًا مختلفًا لنتاجات التجربة، لكنها لا تغير النتاجات. ستصادف بين الفينة والأخرى زاعمًا يقول إنه «أثبت» هذا التفسير أو ذاك تجريبيًا، وأرجح الظن أنه واهم.

- إذًا، كيف اختار كوني؟

- عذرًا؟

- أريد أن أكون في الكون الذي آكل فيه شريحة اللحم. ما الذي يحدد في أي كون سأكون، وكيف أغير ذلك ليعطيني النتيجة التي أريدها؟

- ليست هناك طريقة نعرفها تستطيعين بها التأثير في نتاجات القياس الكمي. الأمر عشوائي تمامًا، سواء فكرتي في الأمر على أنه انهيار دالة موجية، أو مجرد تسلم فرع مفرد من الدالة الموجية الكاملة للكون. أنت محكومة بالعشوائية في الحالتين.

- لكني ظننتَ أنك قلت إن الدالة الموجية دائمًا تخضع لمعادلة شرودنغر في تفسير العوالم المتعددة! ألا تستطيع استخدام ذلك للتنبؤ بأي فرع هو الحقيقي؟

- يمكنك استخدامها للتنبؤ باحتماليات الفروع المختلفة، لكن في كل منها نسخة منك تتسلم نتاجات القياس الخاصة بها. وتعتقد كل نسخة أنها الفرع الحقيقي، وتتساءل لماذا ليست في فرع مختلف. النظرية لا تقول شيئًا بشأن ما إن كان أحد الفروع هو الفرع الحقيقي.

- إذًا، الأمر أشبه بمقامرة؟

- آسف، لكن نعم. إنها أكثر فخامة رياضيًا، لكن حين تتعمقين فيها تجدينها ليست أكثر إرضاءً من تفسير كوبنهاغن. إنها تقلل الأسئلة نوعًا ما.

- التفسيرات غبية.

- لست الوحيدة التي تظن ذلك، لكن ليس بيدنا حيلة حاليًا.

- حسنًا، أنا لا أحبها. أريد أكل شريحة لحم. وإن كان القياس الكمي لن يساعدني في أكل شريحة اللحم، فلا أريده بعد الآن.

- ليست التفسيرات كل ميكانيك الكم أبدًا. لا يعمل على هذه الأشياء غير

قلة من الناس. ينشغل معظم الفيزيائيين بعمل أشياء جيدة باستخدام النظرية عوضًا عن الاهتمام بتفسيراتها.

- أنى لكم عمل أي شيء مفيد عبرها إن كانت القياسات عشوائية؟

- هذا موضوع الفصل القادم.

الفصل الخامس

ألم نصل؟ تأثير زينون الكمي

دخلت البيت متعبًا بعد يوم عصيب في العمل، كنت أركض بين الاجتماعات حتى انتهى بي الحال بصداع رهيب. ستصل كيت إلى المنزل بعد ساعة، وكل ما أريده غفوة. لكن إيمي منتشية برؤيتي وتجوب غرفة المعيشة مؤدية رقصتها السعيدة.

- مرحى! لقد وصلت! مرحى!

[هازة ذيلها بشدة كادت تفقدها اتزانها. كما تفعل في كل أصيل أعود عنده إلى المنزل]

- من الجيد رؤيتكِ أيضًا.

- هيا نفعل شيئًا ممتعًا! هيا نلعب لعبة الالتقاط! هيا نتنزه! هيا نلعب لعبة الالتقاط ونحن نتنزه!

- هيا نتركني أحظى بغفوة.

توقفت عن النط من فورها، وارتسمت على محياها علامات الخيبة، انخفض ذيلها وأذناها وقالت: لا تنزه؟

- ليس الآن.

قلتها وتمددت على الأريكة وأردفت: اتركيني أنم نصف ساعة، ثم سنفعل شيئًا ممتعًا.

- وعد؟

- أعدك، فهلا هدأتِ. كلما أسرعتُ في النوم أسرعنا بعمل شيء ممتع.

- أوه. حسنًا.

استلقيت مريحًا جسدي على الأريكة. وما أوشكت على النوم حتى شعرت بنكزة باردة على وجهي، كان أنف إيمي الرطب التي تقول: «هل أنت نائم؟».

- لا، لست نائمًا.

- أوه.

مرت دقيقة، تبعتها نكزة أخرى وسؤال «هل أنت نائم؟». والجواب نفسه.

ثم دقيقة أخرى، متبوعة بنكزة وهل أنت نائم؟

- لا لست نائمًا.

جلست وأردفت: ولن أنام ما لم تتوقفي عن نكزي وسؤالي هذا السؤال.

- لم لا؟

- أنت توقظيني في كل مرة تنكزيني فيها؛ فأضطر لإعادة العملية من أولها. لن أبلغ مرحلة النوم إن استمررتِ بإيقاظي، ولن نفعل أي شيء ممتع.

- أوه.

ارتسمت على محياها علامات الحكمة وأضافت: الأمر أشبه بتأثير زيرو؟

- تأثير ماذا؟

- أنت تعلم. المفارقة التي فيها الشخص الذي لا يستطيع إمساك السلحفاة لأن عليه قطع نصف المسافة، ثم نصف النصف الآخر، وهكذا فلا يصل إليها أبدًا.

- أنت تقصدين مفارقة زينون، بحرف «ن» كما في «نوم». تأثير زيرو هو فلم من بطولة بيل بولمان وبن ستيلر.

- أيًا كان. أنت تعلم أني لا أجيد التهجي.

- على أي حال، ما تفكرين فيه هو تأثير زينون الكمي، ونعم، إنه يشبه حالتنا قليلًا فهو التالي: إن كان عندك نظام يتحول (ينتقل) من حالة إلى

أخرى، واحتمالية أن يكون في الحالة الثانية تزداد مع الزمن، يمكنك منع انتقاله عبر القياسات (الأرصاد) المتكررة. إذ يسبب قياسك لكونه في الحالة الأولى إعادة العملية من الصفر.

- إذًا، حين أسأل عما إن كنت مستيقظًا فأنا أسبب انهيار دالتك الموجية إلى حالة «مستيقظ»، وأجبرك على إعادة العملية من البداية.

- أو تجدين نفسك تتسلمين فرع الدالة الموجية الذي أكون فيه مستيقظًا، من وجهة نظر العوالم المتعددة. لكن نعم، هذه هي الفكرة الأساسية، والتشبيه جيد بالمناسبة.

- أنا كلبة فيلسوفة.

- نعم، أنت شعلة ذكاء. والآن اصمتي ودعيني أنام.

- حسنًا. لن أسأل إن كنت نائمًا بعد الآن.

- شكرًا لك.

عدت إلى الاستلقاء على الأريكة، وبدأت أشعر بالدفء والراحة، وكدت أنجرف إلى عالم الأحلام ثم...

- [نكزة]

هل أنت مستيقظ؟

إن شيئًا ما يحدث حين تجري عملية قياس (رصد)، سواء آمنت بتفسير كوبنهاغن أو العوالم المتعددة أو أي تفسير آخر. القياس عملية مؤثرة سواء فكرت فيها بأنها انهيار فيزيائي للدالة الموجية، أو تسلم فرع واحد من الدالة الموجية النامية المتوسعة. فيوجد الجسم قبل قياس حالته بتراكب كمي من جميع الحالات الممكنة، لكنك ستجده بحالة واحدة وحيدة عندما تقيسه.

سنلقي في هذا الفصل نظرة إلى أعجب نتيجة للقياس المؤثر: تأثير زينون الكمي. وسنرى كيف يمكن للقياسات المتكررة لجسيم كمي أن تمنعه من تغيير حالته. وكيف يمكننا توظيف هذا التأثير لمعرفة وجود الأجسام في مكان دون قصفها بفوتون واحد حتى.

لا يمكنك بلوغ مكان من هنا: مفارقة زينون

اسم هذا التأثير منسوب للمفارقات الشهيرة للفيلسوف اليوناني زينون الإيلي من القرن الخامس قبل الميلاد. توجد أكثر من نسخة لتلك المفارقات لكنها جميعًا تصب في مجرى إثبات إن الحركة مستحيلة.

إليك نسخة كلبية منها: إن أرادت كلبة بلوغ بسكويتة في الجانب الآخر من الغرفة، فإن عليها أولًا عبور نصف الغرفة، وهذا يستغرق وقتًا محددًا. ثم عليها عبور نصف المسافة المتبقية، وهذا يستغرق وقتًا محددًا كذلك. ثم عليها عبور نصف ما تبقى، وهذا أيضًا يستغرق وقتًا، إلخ. قُسمت مسافة الغرفة إلى عدد لا منتهي من الأنصاف، يستغرق كل منها وقتًا محددًا لقطعه. منطقيًا، يجب أن يساوي جمع عدد لا نهائي من المسافات التي يستغرق قطع كل منها وقتًا محددًا وقتًا لا نهائيًا لعبور الغرفة. لذا يستحيل على الكلبة المسكينة بلوغ البسكويتة اللذيذة.

لحسن حظ الكلاب الجائعة، هناك حل رياضي للمفارقة الظاهرة: كلما صغرت المسافة، قل الوقت اللازم لقطعها. لذا إن لزم الكلبة ثانية لقطع أول نصف من الغرفة، سوف يلزمها نصف ثانية لقطع نصف النصف الباقي، وربع ثانية لقطع نصف ما تبقى، ثم ثُمن ثانية وهكذا. نجد بكتابة هذا الحل رياضيًا:

ثانية + ½ ثانية + ¼ ثانية + ⅛ ثانية + ... = 2 ثانية

نعم إن الوقت اللازم هو نتاج جمع عدد حدود لا نهائي، لكن الحدود تصغر تدريجيًا.

تعلم الرياضيون كيفية جمع هذه الحدود باختراع التفاضل والتكامل في القرنين السابع عشر والثامن عشر. فكان المجموع اللا نهائي يساوي قيمة محددة: الكلبة تقطع الغرفة في ثانيتين.

هذا يعني أن الحركة ممكنة رغم كل شيء، ويمكن لكلبة جيدة بلوغ البسكويتة دائمًا[1].

---

[1] يقبل الفيزيائيون والرياضيون والمهندسون جمع سلسلة لا نهائية حلًا لمفارقة زينون، رغم ذلك فإن بعض الفلاسفة يعترض ولا يقبل به حلًا سليمًا لها (موسوعة ستانفورد للفلسفة). يثبت لك هذا أن الفلاسفة أجنُّ من الرياضيين، وحتى القطط.

القدور المراقبة والذرات المقاسة: تأثير زينون الكمي

يوظف تأثير زينون الكمي طبيعة القياس الكمي المؤثرة لمنع انتقال جسم كمي (مثل ذرة) من حالة إلى أخرى، وذلك عبر قياسها باستمرار.

إن قسنا الذرة بعد مدة وجيزة جدًا من بدء تحولها، أغلب الظن أننا سنجدها ما زالت في الحالة الابتدائية. لكن كما رأينا في الفصل الثالث، يردُّ فعل القياس الذرة إلى حالتها الابتدائية، فيعاد بدء التحول.

إن استمررنا بقياس حالة الذرة، سنستمر بإعادتها من حيث بدأت. تذكرنا ورطة الذرة هذه بمفارقة زينون[2]، كأن الذرة تستمر بالمشي خطوات لا نهائية باتجاه هدف ما، لكنها لا تصل إليه أبدًا. وكما يقول المثل: القدر المراقب لا تغلي أبدًا. إن كانت القدر كمية في الأقل.

هذا مختلف تمامًا عن الفيزياء الكلاسيكية. إذ لا يؤثر قياس حالة جسم في سير العملية، فإن قسنا قدرًا والمياه فيها قطعت 50% من رحلتها نحو الغليان، فإنها ستظل تحتاج إلى 50% أخرى لتغلي. أما تأثير زينون الكمي فيعمل لأنه يوظف طبيعة القياس الكمي المؤثرة، فإما أن تكون القدر تغلي وإما لا تغلي. وإن وجدتها لا تغلي فإنها ستبدأ في الغليان مجددًا من الصفر، كما لو أنك لم تسخنها سابقًا.

أجريت التجربة الحاسمة لتأثير زينون الكمي في سنة 1990 باستخدام أيونات البريليوم، أنجزها واين إتانو وفريق ديفيد وينلاند[3] في المعهد الوطني للمعايير والتقنية في كولورادو. هذه الأيونات هي مجرد ذرات فاقدة لإلكترون واحد، ولها -أسوة بجميع الذرات- مجموعة حالات طاقة مسموح بها تستطيع الانتقال بينها بامتصاص الضوء أو إشعاعه. وظفت

---

[2] لعل أسطورة سيزيف تمثل تلميحًا أدبيًا إغريقيًا أفضل، سيزيف هو الذي عاقبته الآلهة بجعله يدفع صخرة إلى قمة تل ليشاهدها تسقط من جديد، فيكرر العملية إلى الأبد. لكن «تأثير سيزيف» استخدم لوصف شيء آخر، لذا سمي هذا بتأثير زينون الكمي.

[3] المكون من دانيال هاينزن وجون بولينجر وديفيد وينلاند.

التجربة ألوف أيونات البريليوم، وحرَّكتها ببطء شديد من حالة إلى أخرى عبر تعريضها لموجات مايكروية (صُغرية).

عند تركها دون قياس، استغرقت الأيونات 256 ملي ثانية (ربع ثانية) لإكمال الانتقال من الحالة الأولى إلى الثانية[4]. توصف حالة الأيونات في أثناء عملية الانتقال (التحول) بدالة موجية ذات جزئين، يقدم كل جزء احتمالية إيجاد الذرات في الحالة الأولى أو الثانية. كانت جميع الذرات في الحالة الأولى في بداية التجربة، وصارت جميعها في الحالة الثانية عندما انتهت. وفي المدة بين ذلك، كانت احتمالية إيجادها في الحالة الثانية تزداد مع الزمن، واحتمالية إيجادها في الحالة الأولى تنخفض تدريجيًا بالطبع.

قاس (رصد) المختبرون حالة الأيونات باستخدام ليزر فوق البنفسجي، اختير تردده حتى تستطيع الأيونات التي في الحالة الأولى امتصاص الضوء الصادر منه ولا تستطيع التي في الحالة الثانية امتصاص أي منه. تمتص الأيونات التي في الحالة الأولى فوتونات الليزر ثم تعيد إشعاعها في غضون مدة تقاس بالنانو ثانية، صانعةً بذلك مناطق مضيئة تراها آلة التصوير الموجهة إلى الأيونات. أما الأيونات التي في الحالة الثانية فلن تنتج أي ضوء إذا تعرضت لأشعة الليزر. هكذا سيمثل الضوء الذي ترصده آلة التصوير قياسًا دقيقًا لعدد الأيونات التي في الحالة الأولى.

لإظهار تأثير زينون الكمي، أعد القائمون على التجربة عددًا كبيرًا من الأيونات، جميعها في الحالة الأولى. أطلقوا عليها الأشعة المايكروية (التي تحفز انتقالها) وانتظروا 256 ميلي ثانية، ثم أطلقوا شعاع الليزر، فكانت النتيجة متوقعة: لم ينتج أي أيون ضوءًا، ما يشير إلى أن كل العينة باتت في الحالة الثانية (بنسبة 100%).

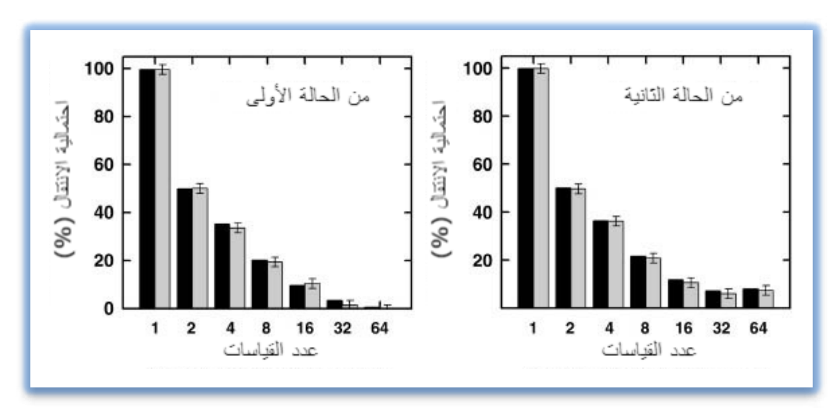
---

[4] تبدو ربع ثانية فترة قصيرة للإنسان أو الكلب، لكنها ليست كذلك لذرة؛ عادة ما تغير الذرات حالاتها في غضون أجزاء قليلة من مليار من الثانية.

ثم كرروا التجربة، لكن هذه المرة أطلقوا نبضتي ليزر لا واحدة، النبضة الأولى بعد 128 ميلي ثانية من بداية التجربة (في منتصف الوقت اللازم لتحول العينة للحالة الثانية)، والأخيرة بعد 256 ميلي ثانية. فلم يجدوا بعد 256 ملي ثانية غير نصف كمية الضوء من التجربة السابقة، ما يشير إلى أن نصف العينة وحسب قد انتقل إلى الحالة الثانية (بنسبة 50%).

يفسر تأثير زينون الكمي انخفاض الاحتمالية الذي حصل بالتالي: قاست نبضة الليزر، التي أطلقت في منتصف الوقت اللازم للانتقال (128 ميلي ثانية)، حالة الأيونات. وجد القياس الكثير من الأيونات في الحالة الأولى فتدمر جزء الحالة الثانية في دالتها الموجية. لذا صارت جميع الأيونات في الحالة الأولى؛ ووجب إعادة تحولها من الصفر ومعاودة احتمالية الحالة الثانية التزايد ببطء من البداية. بعد مرور 128 ثانية أخرى كانت احتمالية إيجاد الأيونات في الحالة الثانية 50% وحسب.

علاوة على ذلك، انخفضت احتمالية الانتقال من الحالة الأولى إلى الثانية أكثر باستمرار القياس. على سبيل المثال، باستخدام أربع نبضات، لم ينتقل بين الحالتين غير 35% من الأيونات. أما بثماني نبضات، لم تنتقل من الأيونات غير ما نسبته 19%. أما حين كانت النبضات 64 تطلق في فترات منتظمة من وقت التجربة الكلي (نبضة كل 4 ميلي ثانية)، لم تنتقل من الأيونات غير أقل من 1% منها. تتوافق كل هذه الاحتماليات مع التنبؤ النظري لتأثير زينون الكمي أحسن توافق، كما موضح في الرسم في الصفحة التالية.



احتمالية تحول الأيونات من حالة إلى أخرى في تجربة تأثير زينون الكمي التي أجراها فريق وينلاند. تمثل الأعمدة السوداء التنبؤ النظري، والرمادية النتاجات المختبرية، مع أعمدة صغيرة تمثل هامش الخطأ في التجربة. تلاحظ أن احتمالية تحول الحالة يقل بزيادة القياس، سواء تحولت الأيونات من الحالة الأولى للثانية أو من الثانية للأولى.

- إذًا، تنهار الدالة الموجية لأن الأيون يمتص الفوتون الذي تستخدمه لإجراء عملية القياس؟

- في الحقيقة، لا يتطلب «الانهيار» امتصاص الأيون لأي فوتون. لقد أعيدت التجربة باستخدام أيونات تتحول من الحالة الثانية إلى الحالة الأولى (بالعكس). وهنا بدأت الأيونات في حالة «مظلمة» لا تمتص فيها أي فوتون في أثناء القياس. لكن النتاجات كانت نفسها! بمعنى أن احتمالية انتقال الأيون من الحالة الثانية إلى الأولى انخفضت لازدياد القياس لا لغيره، كما تنص النظرية تمامًا.

- مهلًا لحظة، امتصاص فوتون مثل عدم امتصاصه؟

- عندما نفكر فيه على أنه أداة قياس، نعم. إنه مثل البسكويتة في صندوقين، فإن فتحتِ أحدهما ووجدته فارغًا، ستعلمين أن البسكويتة في الصندوق الآخر. ستتحدد حالة البسكويتة كما لو فتحتِ الصندوق الآخر ووجدتها فيه.

- لكن ذلك ليس ممتعًا، لأني لا أحصل على البسكويتة.

- ماذا عساي أقول، حياتك صعبة جدًا.

• • •

لا يعتمد تأثير زينون الكمي على تفسير محدد لميكانيك الكم. مع ذلك من الأسهل النظر إليه من زاوية تفسير كوبنهاغن وانهيار الدالة الموجية، لكن يمكننا وصفه باستخدام تفسير العوالم المتعددة كذلك. في التفسير الأخير، تظهر فروع جديدة من الدالة الموجية عند كل قياس، لكن يرجح أن نتسلم الفرع الأعلى في الاحتمالية. في كلا التفسيرين، احتمالية رؤية تغير في الحالة هو نفسه.

يمكننا استخدام تأثير زينون الكمي لتقليل احتمالية تحول حالة نظام ما بنحوٍ هائل، وذلك بقياسه باستمرار وحسب. مع ذلك لا يمكننا جعل احتمالية التحول تساوي صفرًا -هناك دائمًا احتمالية ضئيلة لتحول الحالة رغم عمليات القياس- لكننا نستطيع جعلها صغيرة جدًا، مثبتين فعالية القياس الكمي.

• • •

- البشر كائنات سخيفة. إن أردت إيقاف التحول فلم لا توقف الموجات المايكروية وحسب؟

- صحيح، لكن هدفنا إثبات تأثير زينون الكمي. ليس التأثير مثيرًا لقدرته على إيقاف تحول حالة الأيونات؛ بل لما يخبرنا به عن الفيزياء الكمية.

- نعم، لكن ما الفائدة منه؟ هل يمكن استغلاله لعمل شيء مفيد؟

- حسنًا، يمكنك استخدامه لرصد الأجسام دون جعلها تمتص أي ضوء.

- أجسام... مثل الأرانب؟

- افتراضيًا، نعم.

- يعجبني هذا!

القياس بلا نظر: الاستجواب الكمي

يمكننا استغلال تأثير زينون الكمي لعمل أشياء مذهلة. لقد برهن تعاون جامعة إنسبروك ومختبر لوس ألاموس الوطني أن من الممكن استخدام الضوء لرصد وجود جسم ماص، دون أن يمتص أي فوتون، وذلك باستثمار تأثير زينون الكمي لإيقاف فوتون متحرك من مكان إلى آخر. ربما تستخدم هذه التقنية مستقبلًا لدراسة خصائص الأنظمة الكمية الأوهن من أن تتحمل امتصاص ولو فوتون.

إليك نسخة مُيسَّرة من تجربة الاستجواب الكمي: تخيل وجود فوتون يتحرك ذهابًا وإيابًا بين مرآتين عاكستين كليًا. وأدخلنا بينهما مرآة ثالثة ليست عاكسة بنسبة 100%.

تتكون الدالة الموجية لهذا النظام من جزئين، أولهما متعلق بإيجاد الفوتون في الجزء الأيسر من الجهاز، والثاني بإيجاده في الجزء الأيمن.

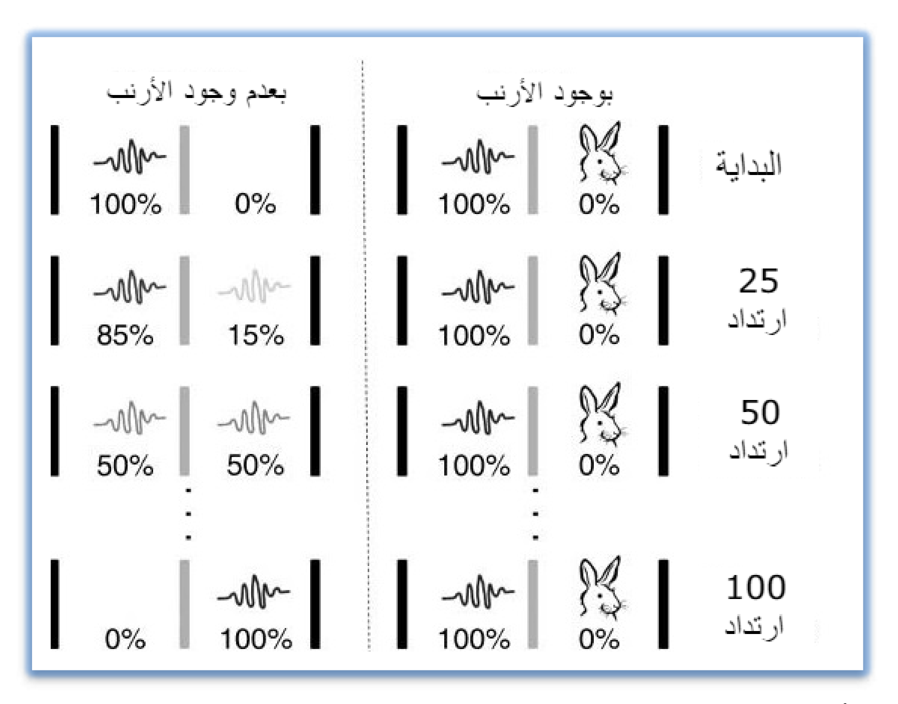
إن بدأنا التجربة بفوتون واحد في النصف الأيسر، سنجد أنه ينفذ إلى النصف الأيمن بعد حين. هناك فرصة صغيرة لنفاذ الفوتون عبر المرآة الوسطية في كل مرة يصدمها، لذا تنخفض قيمة جزء الدالة الموجية الذي يمثل احتمالية وجود الفوتون في النصف الأيسر، وترتفع قيمة جزئها الآخر الذي يمثل احتمالية وجود الفوتون في النصف الأيمن. في النهاية، تصبح قيمة الجزء الممثل للنصف الأيسر مساوية للصفر، وتساوي احتمالية إيجاد الفوتون في النصف الأيمن 100%. ثم ينعكس الأمر ويعود الفوتون إلى النصف الذي أتى منه، وهكذا. سينفذ الفوتون ببطء بين جانبي الجهاز، كما الأيونات في تجربة البريليوم التي انتقلت بين الحالة الأولى والثانية.

يمكننا ملاحظة تأثير زينون الكمي بإضافة جهاز يقيس موقع الفوتون، مثل أرنب نضعه في النصف الأيمن من الجهاز. في كل مرة يصدم الفوتون المرآة الوسطية، سيقيس الأرنب ما إن مر عبرها أم لا؛ ولكونه أرنب فزع، فإنه سيهرب حالما يرصد ولو فوتونًا واحدًا في النصف الأيمن.

في حضور الأرنب، سيمنع تأثير زينون الكمي عملية النفاذ المتكررة التي كانت تحصل في غيابه. إن مر الفوتون عبر المرآة فإن الأرنب سيمتصه ويهرب مذعورًا؛ لن يعود هناك فوتون لذا ستكون دالته الموجية تساوي صفرًا. أما إن لم يمر الفوتون، فإنه قطعًا سيكون في الجانب الأيسر، وستعاود الدالة الموجية البدء من الحالة الابتدائية لكون الفوتون في الجانب الأيسر، ويتكرر كل شيء.

يتيح لنا تأثير زينون الكمي فعل ما تتمناه أي كلبة: تحديد ما إن كان هناك أرنب في الجهاز دون إخافته. وذلك بوضع فوتون في النصف الأيسر، والانتظار مدة تكفي لنفاذه إلى النصف الثاني، ثم النظر إلى النصف الذي وضعناه فيه. فإن لم يكن هناك فوتون فهذا يعني عدم وجود أرنب في النصف الأيمن؛ إما لأنه امتص الفوتون وهرب، وإما لعدم وجوده في المقام الأول والفوتون قد نفذ ببساطة إلى اليمين. وإن وجدنا الفوتون ما يزال في النصف الأيسر الذي وضعناه فيه فهذا يُعلِمنا أن هناك أرنبًا في النصف الآخر، وهو ما زال موجودًا هناك ولم يمتص ولو فوتونًا واحدًا.

هناك دائمًا فرصة لنفاذ الفوتون وإخافة الأرنب، لكن يمكننا خفض احتمالية حدوث ذلك كما نشاء، بتقليل احتمالية نفاذ الفوتونات عبر المرآة الوسطية (وضع مرآة وسطية أكثر عكسًا). سترتفع احتمالية رصد الأرنب بنجاح على نحوٍ هائل إن فعلنا ذلك، رغم أن علينا الانتظار مدة أطول لإتمام القياس بسبب زيادة الوقت اللازم لنفاذ الفوتون. إن كان على الفوتون أن يرتد بين الجانب الأيسر والمرآة الوسطية 100 مرة قبل أن ينفذ إلى اليمين، فإن احتمالية رصد الأرنب دون إخافته هي 98.8%؛ أي إننا إن أعدنا التجربة ألف مرة لن يهرب غير 12 أرنبًا.



نبدأ بفوتون يرتد جيئة وذهابًا في النصف الأيسر. سينتقل الفوتون إلى النصف الأيمن بعد حين لأن هناك احتمالية صغيرة لنفاذه عبر المرآة الوسطية. لكن وجود جسم ماص (أرنب) في النصف الأيمن يمنع انتقال الفوتون بتأثير زينون الكمي.

• • •

- عظيم! هذا يعني أن كل ما أحتاج إليه بعض المرايا الكبيرة...

- لا. لن تجري هذه التجربة في الحديقة الخلفية.

- لكن يمكنني استخدام تأثير زينون الكمي للتسلل إلى الأرانب و...

- لا. قطعًا لا. ليس مسموحًا لك وضع مرايا كبيرة في الحديقة، هذا نهائي.

- يا لحظي.

لم يستخدم الاستجواب الكمي لصيد الأرانب قبلًا، لكنه أثبت تجريبيًا باستخدام الفوتونات المستقطبة، بتجارب أجراها فيزيائيون في جامعة إنسبروك ولوس ألاموس وإيلينوي.

يتيح لنا الاستجواب الكمي أشياء رائعة، مثل تصوير الأجسام دون الحاجة إلى صدمها بالضوء وانتظار ارتداده عنها. هذه الخاصية ليست مفيدة للأغراض التجسسية (إلا إن استطعت اقناع أعدائك بحفظ أسرارهم طواعية بين مرآتين)، رغم ذلك فإنها أساسية لاستكشاف الأنظمة الكمية الواهنة مثل مجموعة كبيرة من ذرات في حالات تراكب ستنهار إن امتصت فوتونًا واحدًا.

يمثل تأثير زينون الكمي برهانًا جليًا على الطبيعة الغريبة لميكانيك الكم، سواء عددته انهيارًا للدالة الموجية كما في تفسير كوبنهاغن، أو فك ترابط حاصل في دالة موجية واحدة نامية كما في تفسير العوالم المتعددة. يغير قياس نظام كمي حالة ذلك النظام تاركًا له حالة واحدة من حالاته المسموح بها، وهذا خلاف ما اعتدنا عليه في القياس الكلاسيكي.

يمكن -بترتيب ذكي للظروف التجريبية- استغلال هذا التأثير لمنع نظام ما من تغيير حالته، بل وحتى استخراج معلومات من نظام دون التفاعل معه مباشرة.

• • •

- هذا مثير جدًا. غريب، لكن مثير.

- شكرًا.

- عن إذنك الآن، يجدر بي الذهاب والنظر إلى وعائي.

- لماذا؟

- أنوي استغلال تأثير زينون لتحصيل طعام أكثر. أظن أن استمراري بقياس وعائي وهو مملوء بالطعام، سيعني أني سأمتلك الطعام دائمًا بغض

النظر عن كم آكل. سيكون ذلك ممتعًا.

- وإن استمررتِ بقياسه وهو فارغ، فإنه سيكون فارغًا دائمًا ولن تحصلي على الطعام أبدًا.

- أوه. لم أفكر في ذلك. سيكون سيئًا!

- على أي حال، يجب أن تكون هناك عملية كمية طبيعية تسبب ظهور الطعام في الوعاء لينجح ما تقولين. الأشياء لن تظهر من العدم لمجرد أنك ترغبين في قياسها.

- حسنًا، ألست تضع الطعام في وعائي بانتظام؟ وأنت عملية طبيعية.

- بنحوٍ أو بآخر نعم.

- إذًا، ما رأيك في وضع بعض الطعام في وعائي؟

- حسنًا، هيا بنا، لقد شارف وقت العشاء.

- مرحى! العشاء!

الفصل السادس

لا داعي للحفر: النفق الكمي

في مساء مشمس جميل، طاب لنا الخروج إلى الحديقة؛ استلقيت على كرسيي القابل للطي أقرأ كتابًا، وبقربي إيمي باسطة ذراعيها بالنجيل، مستمتعة بأشعة الشمس الذهبية ويقظة لأي توغلات سنجابية.

بادرت إيمي: «أيمكنني سؤالك عن شيء؟»، أجبتها إلى ذلك لتردف: ماذا تعرف عن النفقية؟

قلت واضعًا كتابي جانبًا: أتسألين عن النفق الكمي؟ إنه ظاهرة عبور جسيم إلى الجانب الآخر من حاجز، رغم عدم امتلاكه طاقة كافية لعبوره.

- حاجز! تعني مثل سياج؟

- نعم، مجازيًا في الأقل.

- مثل السياج الذي بين حديقتنا والحديقة المجاورة؟ [تعابيرها كلها أمل]

-فهمت إلام ترمين، أهذا مبتغاك؟

قالت وهي تهز ذيلها «توجد أرانب هناك»، لكنها سرعان ما اكتأبت وأضافت «ولا أستطيع بلوغها».

- نعم توجد، لكني لا أرى ظاهرة النفق الكمي (النفقية) حلًا لذلك. إنها تناسب الجسيمات الصغيرة، لا كلبة بحجمك.

- لم لا؟

- حسنًا، فكري في الحاجز من منظور الطاقة الكامنة والطاقة الحركية. على سبيل المثال، أنتِ لا تتحركين في هذه اللحظة، لذلك كل طاقتك هي طاقة كامنة. لكنك تستطيعين البدء بالحركة، لنقل لمطاردة سنجاب، بتحويل تلك الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية...

- أنا سريعة جدًا. لدي الكثير من الطاقة.

- نعم، أعلم. أنتِ قدوة لنا. على أي حال، أنتِ تملكين ذات كمية الطاقة الكلية سواء كنتِ تجلسين أو تتحركين. ولا يختلف غير الصورة التي تكون فيها تلك الطاقة.

- حسنًا، وما علاقة هذا بالسياج؟

- عِدِّي السياج مكانًا لا تستطيعين الوصول إليه إلا إن امتلكتِ طاقة كافية. إن أردتِ الوجود حيث يوجد السياج، فإما أن تقفزي عاليًا من فوقه وإما أن تشغلي ذات الحيز الذي يشغله؛ وكلا الأمرين يحتاج إلى كمية طاقة ضخمة.

- لكني لا أستطيع القفز من فوقه. لذلك لا أستطيع الوصول إلى الأرانب.

- نعم، ليس لديك طاقة كافية لعبور السياج. ولكونك لا تملكين ما يكفي من الطاقة، لا تستطيعين الوصول إلى حديقة الجيران، والجميع أسعد هكذا، صدقيني.

مطت شفتيها عبوسًا وقالت: سواي.

واسيتها بالفرك خلف أذنيها. وأضفت: رغم ذلك، يتنبأ ميكانيك الكم بوجود احتمالية لعبور السياج والوصول إلى الجانب الآخر وإن لم تمتلكي الطاقة الكافية لعبوره قفزًا! يمكنك نوعا ما المرور عبره، كأنه غير موجود.

- كما تفعل الأرانب؟

- ماذا تقصدين؟

- الأرانب. إنها تعبر السياج جيئة وذهابًا طوال الوقت.

- هذا لأنها تستطيع المرور بين ألواحه. ليس للأمر علاقة بظاهرة النفقية... مع ذلك، هذا التشبيه ليس سيئًا؛ فالأرانب أيضًا لا تمتلك طاقية كافية لعبور السياج بالقفز، لكنها تمر عبره وتصل إلى الجانب الآخر. هذا يشبه النفقية نوعًا ما.

- لم تخبرني، كيف أعبر من خلال السياج؟

- حسنًا، يمكنك التقليل من تناول المقرمشات لتصبحي نحيلة كفاية للمرور من بين الألواح، كما تفعل الأرانب.

- لا أحب هذه الخطة. أنا كلبة جيدة. وأستحق المقرمشات التي أتناولها.

- أنت كذلك بالفعل. الخيار الثاني استخدام ظاهرة النفقية لعبور السياج؛ لكن هذه العملية ليست شيئًا تستطيعين فعله متى أردتِ، بل تحدث تلقائيًا. إن أطلقتِ مجموعة جسيمات باتجاه حاجز ما، فإن جزءًا صغيرًا منها سيعبر الحاجز ويصل إلى الجانب الآخر. لكن لا يمكن تحديد أي الجسيمات سوف يعبر، الأمر عشوائي متروك للاحتمالية.

- إذًا، كل ما عليَّ فعله هو الانطلاق نحو السياج مرات كافية، إلى أن ينتهي بي الأمر في الجانب الآخر؟

- ما كنت لأفعلها إن كنت في محلك. تعتمد احتمالية مرور الجسيم نفقيًا عبر حاجز على سمك الحاجز والطول الموجي للجسيم. احتمالية أن تعبر كلبة تزن نحو 20 كيلوغرامًا من سياج من الألمنيوم سمكه سنتمتر ونصف تقريبًا ستكون مثل 1 مقسومًا على e مرفوعةً للأس العاشر المرفوع للأس السادس والثلاثين ($1/e^{10^{63}}$). هل تعلمين كم تساوي هذه؟

- كم؟

- صفرًا، للدقة فإنها قريبة من الصفر فلا يكون هناك فرق ملموس. لذا لا ترمي بنفسك إلى السياج.

وجدتها صامتة، فأخذت كتابي لأعاود القراءة وقلت لها: آمل أني أجبت عن سؤالك.

- نوعًا ما.

- ماذا تعنين؟

- حسنًا، موضوع النفق الكمي ممتع لكني كنت أسأل عن النفق الكلاسيكي.

- نفق كلاسيكي؟
- نعم، كنت أريد الحفر تحت السياج.
- أوه.
وأضافت هازة ذيلها بحماس وعلى محياها علامات الفخر: إنها خطة جيدة!
- لا، ليست كذلك. لا يحفر الأنفاق غير الكلاب السيئة.
أوقفت حركة ذيلها، وأخفضت رأسها: لكنني كلبة جيدة، ألست كذلك؟
- نعم، أنتِ كلبة رائعة. أنتِ الأفضل.
انقلبت على ظهرها وقالت: افرك بطني إذًا. فوضعت كتابي جانبًا وفعلت.

• • •

ظاهرة النفقية هي من أكبر مفاجآت ميكانيك الكم، فيها يمر جسيم يتجه نحو حاجز ما -مثل كلبة باتجاه سياج- عبر ذلك الحاجز كما لو أن الحاجز غير موجود. هذه الظاهرة الغريبة هي نتيجة مباشرة للطبيعة الموجية للجسيمات الكمية، التي فصلناها في الفصل الثاني.

سنتحدث في هذا الفصل عن المبدأ الفيزيائي الجوهري للطاقة، وكيف تحدد الطاقة أين يمكن إيجاد الجسيمات. سنرى أن الطبيعة الموجية للمادة تتيح للجسيمات الكمية الظهور في أماكن يجب ألا تظهر فيها حسب الفيزياء الكلاسيكية، وذلك عبر التخلل في الأجسام الصلبة بل وحتى المرور عبرها. سنرى أيضًا كيف أتاحت النفقية للعلماء صنع مجاهر تستطيع دراسة بنية المادة في المستوى الذري، فاتحة باب تطورات ثورية في الكيمياء الحيوية وتكنولوجيا النانو.

القدرة على إتمام العمل: الطاقة

لتفهم النفقية، علينا أولًا الحديث عن الطاقة من منظور الفيزياء الكلاسيكية. فقد بات مصطلح الطاقة يستخدم بكثرة في الحياة اليومية، وهو يختلف قليلًا من الناحية الفيزيائية.

نعرِّف الطاقة فيزيائيًا بإيجاز بالقول «إن محتوى الطاقة في جسم هو مقياسٌ لقدرة الجسم على تغيير حركته أو حركة جسم آخر».

يملك الجسم طاقة لأنه يتحرك، أو لأنه ساكن في مكان قد يبدأ منه بالحركة. وتملك كل الأجسام طاقة معينة، لأن لها كتلة ($E = mc^2$) ولأن حرارتها أعلى من الصفر المطلق[1]. ويمكن استخدام كل صور الطاقة تلك لتحريك جسم ساكن، أو لإيقاف جسم متحرك أو تغيير مساره.

أوضح صورة من صور الطاقة هي الطاقة الحركية، وهي طاقة الأجسام المتحركة. تساوي الطاقة الحركية لجسم يتحرك بسرعات اعتيادية حاصل ضرب نصف كتلته بمربع سرعته:

الطاقة الحركية = ½ الكتلة * السرعة^2

$$KE = \tfrac{1}{2} mv^2$$

[1] الحرارة هي مقياس طاقة الجسم معيارها حركة الذرات المنفردة التي تؤلفه، والصفر المطلق هي درجة حرارة افتراضية تتوقف عندها تلك الحركة. لا يمكن تبريد أي جسم واقعي إلى الصفر المطلق تمامًا، وحتى إن أمكن فإن الجسم سيظل محتفظًا بطاقة النقطة الصفرية (كما ناقشنا في الفصل الثاني، الصفحة 66).

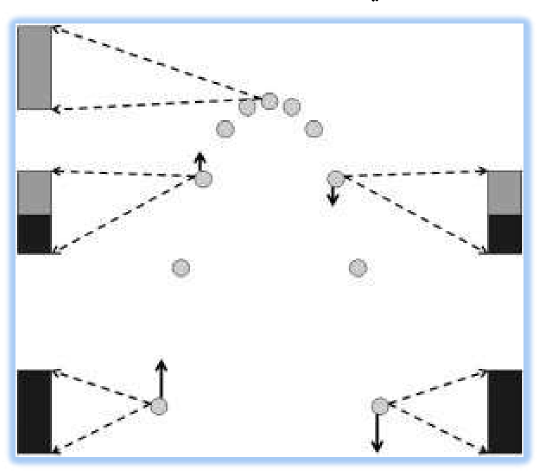
الطاقة الحركية هي كمية موجبة دائمًا، وتزيد بزيادة السرعة أو الكتلة. أي إن لكلب دنماركي ضخم طاقة حركية أكثر من كلب تشيواوا صغير يتحرك بذات سرعته، وكذلك الحال لكلب هسكي سيبيري نشيط مقارنة بكلب صيد عجوز كسول من نوع بلودهاوند له ذات الكتلة. تشبه الطاقة الحركية الزخم، مع أنها تزيد باطراد أكبر بزيادة السرعة، كذلك فإنها لا تعتمد على اتجاه الحركة (بعكس الزخم).

أما الأجسام غير المتحركة، فلها القدرة على التحرك بفضل التفاعلات مع الأجسام الأخرى، وهذا ما نسميه طاقة كامنة. يمتلك جسم ثقيل موضوع على طاولةٍ طاقةً كامنة، إذ يمكن أن يكتسب طاقة حركية رغم سكونه، مثلًا عندما تصدمه كلبة مفرطة النشاط فيسقط عليها. كذلك يمتلك مغناطيسان مثبتان قرب بعضهما طاقة كامنة، إذ سيتجاذبان أو يتنافران حين يتركان. والكلبة مثلها تمتلك طاقة كامنة دائمًا، حتى وهي نائمة، فهي تثب وتنبح فور سماعها أدنى صوت.

الطاقة أساسية للفيزياء لأنها «كمية محفوظة»؛ فقد نص قانون حفظ الطاقة على «إن الطاقة يمكن تحويلها من صورة لآخر، لكن الطاقة الكلية في نظام ما لا تتغير». وبفضل هذا الحفظ تتحول بعض أصعب المسائل إلى مجرد تمارين في المحاسبة، إذ يجب أن تكون الطاقة الكلية (الحركية + الكامنة) هي نفسها في بداية المسألة ونهايتها، لذا فإن أي كمية متبقية من طرح الطاقة الكامنة من الكلية ستمثل الطاقة الحركية[2].

[2] الطاقة الكامنة عمومًا أسهل حسابًا من الطاقة الحركية، فهي تعتمد على موقع الأجسام المتفاعلة، في حين تعتمد الطاقة الحركية على السرعة، التي تعتمد بدورها على ما حدث في الماضي القريب. عادة ما تكون أسهل طريقة لحل مسائل الطاقة هي حساب الطاقة الكامنة باستخدام الموقع ثم إيجاد الطاقة الكلية بعملية الإقصاء. على سبيل المثال، حين تتوقف لعبة الأفعوانية مؤقتًا في القمة فإننا نعلم أن كامل طاقتها بات طاقة كامنة. يمكننا حساب الطاقة الكامنة بيسر لاحقًا من ارتفاع السكة، وهذا يتيح لنا حساب الطاقة الحركية (فالسرعة) دون الحاجة إلى معرفة ما حدث بين ذلك.

لنفهم الطاقة أفضل، دعنا نتخيل كرة تُرمى إلى الأعلى. كما يعرف أي كلب، ما طار طير وارتفع إلا كما طار وقع، لذا سوف تتباطأ الكرة -المرمية بسرعة ابتدائية- تدريجيًا ثم تتوقف ثم تسقط. انظر إلى الرسم الآتي لتتخيل الفكرة، إنه يظهر ارتفاع الكرة في مدد زمنية متعاقبة متساوية. الكرة تتحرك بسرعة عالية في الارتفاعات الواطئة لذا فإنها تقطع مسافات أكبر في المدد الزمنية المحددة في الرسم. لكنها تتحرك ببطء في الارتفاعات العالية، حتى تتوقف تمامًا في القمة لجزء من الثانية.



تبدأ الكرة المرمية إلى الأعلى بالحركة بسرعة عالية، وتتباطأ تدريجيًا بفعل الجاذبية، حتى تبدأ في الهبوط إلى الأرض. تظهر الصورة موضع الكرة في الهواء في فترات منتظمة (بين كل كرة وأخرى فرق عشر ثانية مثلًا). تظهر الأعمدة طاقة الكرة، حيث الأسود طاقة حركية والرمادي طاقة كامنة. تكون كل الطاقة حركية قرب الأرض، وكلها كامنة في أعلى ارتفاع تصل إليه الكرة.

لنَصِف رحلة هذه الكرة من منظور الطاقة: تكون الكرة متحركة في اللحظة بعد الرمي، لذا فإن طاقتها الحركية عالية؛ لكنها قرب الأرض وليس لها طاقة كامنة. في هذه الحالة، تساوي الطاقة الكلية الطاقة الحركية.

يمكن التفكير في ذلك بأنه نوع من مخزون طاقة، مثل إناء مملوء بالبسكويت، ويظهر بالأسود في الشريط في الرسم. تقل الطاقة الحركية للكرة بزيادة ارتفاعها (لأن سرعتها تقل تدريجيًا)، في حين تزيد طاقتها الكامنة (لأنها تبتعد عن الأرض). سينخفض منسوب الطاقة الحركية تدريجيًا حتى تحل محلها الطاقة الكامنة في القمة، لكن الطاقة الكلية تظل نفسها لا تتغير.

تكون الكرة بطاقة كامنة ودون طاقة حركية في القمة لأنها تسكن للحظة. وتعاود العملية التكرار على نحوٍ معكوس في أثناء السقوط: تبدأ بطاقة كامنة دون طاقة حركية، وتنتهي بطاقة حركية (تساوي التي ابتدأت بها) دون طاقة كامنة.

• • •

- لقد عكست الأمر.

- حقًا؟ كيف؟

- نعم، يجدر بك أن تشبه إناء البسكويت بالطاقة الكامنة لا الحركية، لأن البسكويت يزودني بالطاقة عندما آكله. ويجب أن تشبه الإناء الفارغ بالطاقة الحركية، لأني أركض في كل مكان بعد أكل ما كان فيه.

- ربما تكونين محقة في هذا بعض الشيء. بالطبع، لا يمكن أن يكون تشبيه الطاقة ببسكويت الكلاب مثاليًا أبدًا.

- لماذا؟

- السبب واضح، كما يمكن تحويل الطاقة الكامنة إلى حركية، يمكن تحويل الطاقة الحركية إلى كامنة، وهذا يشبه إعادة البسكويت إلى الإناء.

- أوه. أنا لا أفعل ذلك البتة!

- لقد لاحظنا، صدقيني.

علاوة على ما سبق، نرى من النظر في مستويات طاقةِ كرةٍ محلقة في الهواء أن الطاقة تحد حركة الكرة، وإليك تفصيل ذلك: تبدأ الكرة رحلتها بكمية طاقة كلية، جميعها بصورة طاقة حركية، وتحولها إلى طاقة كامنة باستمرار ارتقائها للأعلى. حتى إذا تحولت الطاقة الحركية الابتدائية إلى كامنة، توقفت الكرة. أي إن الكرة لا تستطيع الوصول إلى نقطة فوق أقصى ارتفاع لها، لأن ذلك يستلزم أن تزيد طاقتها الكلية، وهذا غير ممكن[3]. يسمى أقصى ارتفاع يمكن لكرة ذات طاقة معينة الوصول إليه بـ«نقطة الانعطاف»، لأن مسار الكرة يعكس في تلك النقطة. والارتفاعات الأعلى من نقطة الانعطاف «محظورة»، لأن الكرة لا تملك كمية طاقة تكفي لبلوغها.

---

[3] يمكن أن تزيد الطاقة الكلية لجسم عبر إضافة طاقة إليه من مصدر آخر، بذات الطريقة التي يملأ بها إنسان ودود إناء البسكويت الخاص بكلبة. لكن الطاقة الإضافية ليست مجانية، إذ ستنخفض طاقة الجسم الواهب، كما ينخفض رصيد حساب الإنسان الودود الذي يملأ إناء البسكويت. الطاقة الكلية للكون كله -بكلابه وكراته وكل ما فيه- هي كمية ثابتة، لم تزد ولم تنقص منذ الانفجار العظيم قبل نحو 14 مليار سنة.

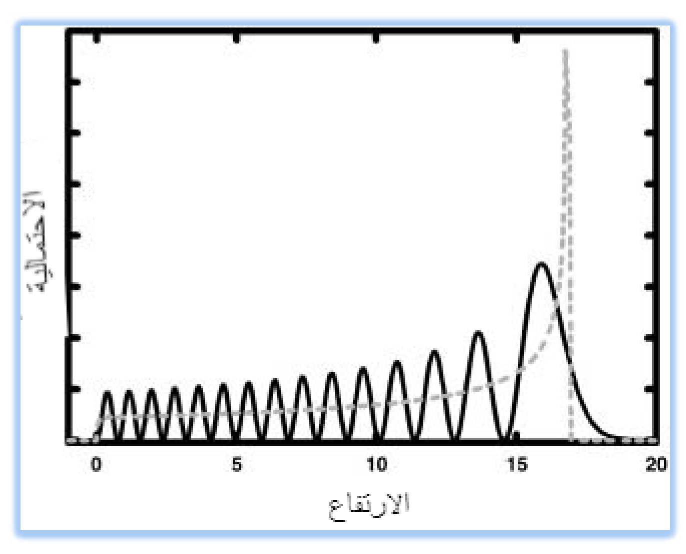
اتبع الدالة الموجية المرتدة: كرة كمية

إن الكرة المرمية مثال يسير عن الطاقة وفعلها. ولعل التفكير في الكرة من منظور الطاقة لا يبدو بتلك الفائدة، لكن يمكننا تطبيق تحليل الطاقة على أنظمة أعقد بكثير، بضمنها حالات لا يمكن وصفها إلا رياضيًا باستخدام الطاقة. ما يجعل الطاقة من أهم أدوات الفيزيائيين لفهم العالم.

للطاقة أهمية خاصة في ميكانيك الكم. فكما رأينا في الفصل الثاني، ليس للجسيمات الكمية موقع محدد ولا سرعة محددة، لذا لا يمكننا متابعة تغيّر هذه الكميات كما نفعل في الأنظمة الكلاسيكية. لحسن الحظ، ينطبق قانون حفظ الطاقة على هذه الجسيمات، لذا يمكننا فهم الأنظمة الكمية عبر دراسة طاقتها. في الواقع، تستخدم معادلة شرودنغر طاقة الجسيم الكمي الكامنة للتنبؤ بما سيحدث لدالته الموجية، هذا يعني أن كل حساب في ميكانيك الكم يتمحور حول الطاقة.

يمكن فهم علاقة الطاقة بالدالة الموجية عبر تخيل كرة كمية ترمى في الهواء. لأننا نستطيع التنبؤ ببعض سمات دالتها الموجية من مجرد معطياتنا عن طاقتها. تتناسب الطاقة الحركية والزخم طرديًا، ونعلم من الفصل الأول أن الزخم يحدد الطول الموجي للأجسام، لذا عندما تكون الكرة قريبة من الأرض حيث طاقتها الحركية عالية، سيكون زخمها عاليًا ما يجعل طولها الموجي قصيرًا. أما في الأماكن الأعلى حيث تتحرك ببطء، يكون زخمها واطئًا ما يجعل طولها الموجي طويلًا. علاوة على ذلك، نتوقع أن تساوي احتمالية إيجاد الكرة بعد نقطة الانعطاف صفرًا، لأن الكرة يجب ألا تستطيع بلوغ ارتفاع أعلى من الذي تتيحه طاقتها.

نجد بحساب الدالة الموجية لهذا النظام أننا نستطيع تمثيل التوزيع الاحتمالي بالرسم في الصفحة التالية.



يمثل المنحني الغامق التوزيع الاحتمالي لإيجاد الجسيم الكمي نسبة للارتفاع. ويمثل الخط المتقطع التوزيع الاحتمالي لجسيم كلاسيكي.

نجد بالنظر إلى المخطط ذات توقعاتنا تقريبًا. حيث يتذبذب التوزيع الاحتمالي أسرع في الارتفاعات المنخفضة (إلى اليسار)، منه في الارتفاعات الأعلى (إلى اليمين). لكننا نجد شيئًا غريبًا غير متوقع حين ندقق في المخطط: لا تنخفض الاحتمالية إلى الصفر في نقطة الانعطاف الكلاسيكية (تقريبًا في الوحدة 17 في الرسم، حيث ينخفض الخط المتقطع إلى الصفر). نعم إنه ينخفض إلى الصفر في النهاية، لكن هناك تذبذب كبير وراء نقطة الانعطاف، ما يعني أن الاحتمالية لم تزل موجودة ويمكن وجود الكرة في أماكن أعلى من نقطة الانعطاف التي يفترض ألا تتجاوزها!

لم لا تنخفض الاحتمالية إلى الصفر عند نقطة الانعطاف؟

لأن انخفاضها الفوري سيسبب تغيّرًا مفاجئًا في الدالة الموجية في تلك النقطة. ونحن نعلم من الفصل الثاني (صفحة 55) أن عمل تغير فوري في الدالة الموجية يستلزم إضافة عدد كبير من الدوال الموجية ذات الأطوال الموجية المختلفة. تعني الأطوال الموجية الكثيرة ريبة كبيرة في الزخم، ثم ريبة كبيرة في الطاقة الحركية. لكننا لسنا في ريبة بخصوص الطاقة الحركية! لأننا نعلم القوة التي رمينا بها الكرة. ولكون الريبة صغيرة في الطاقة فلا بد أن تكون الريبة في موقع نقطة الانعطاف كبيرة، ما يعني عدم وجود دالة موجية ذات تغير فوري بل دالة موجية تنفذ في المنطقة المحظورة.

لا يمكن للكرة أن تمتلك طاقة معلومة بدقة وتوجد حيث تتنبأ الفيزياء الكلاسيكية في ذات الوقت. علينا تقبل زيادة في الريبة فيما يتعلق بالموضع إن أردنا زيادة في الدقة في الطاقة، وهذا يعني وجود احتمالية للعثور على الكرة في ارتفاعات لا يمكن أن تصل إليها حسب الفيزياء الكلاسيكية.

• • •

- عذرًا، لكن لماذا تكبر الاهتزازات قرب القمة؟

- لقد قلت ذلك. الطول الموجي يزيد لأن الكرة تتحرك أبطأ.

- نعم أعلم ذلك، لكنها تزيد طولًا أيضًا!

- هذا لأن احتمالية العثور على الكرة في القمة أو قربها أكبر من احتمالية العثور عليها في أي مكان آخر، لأن الكرة تتحرك هناك بأبطأ سرعاتها، لذا تقضي وقتًا أطول. الأمر نفسه فيما يخص التوزيع الاحتمالي في الفيزياء الكلاسيكية (ممثل في الرسم بشكل خط متقطع).

- هذا يعني أن أرجح مكان لوجود الكرة هو في الأماكن الأعلى؟

- نعم. يمكنك رؤية ذلك بالنظر إلى الرسم الذي يظهر الكرة في الهواء (في

الصفحة 144). لإن صور الكرة وهي في الارتفاعات العالية أكثر من صورها في الارتفاعات الأوطأ، رغم أن الفارق الزمني بين الصور واحد. لهذا السبب عادة ما تلتقطين الكرة وهي في أعلى ارتفاع لها حين نلعب لعبة الالتقاط؛ يسهل التقاطها هناك لأنها لا تتحرك بسرعة كبيرة.

- أنا بارعة في التقاط الأشياء. يجدر بنا أن نلعب لعبة الالتقاط! إنها ممتعة!

- حالما ننهي هذا الفصل، موافقة؟ ما زلت لم أتحدث عن النفق الكمي.

- صحيح. لنتحدث عن ظاهرة النفقية. المرور عبر الأجسام الصلبة ممتع أكثر من الالتقاط.

- لا تتأملي الكثير...

كأنه غير موجود: اختراق الحاجز والنفقية

كيف تؤدي الريبة في نقطة الانعطاف إلى مرور الجسيمات عبر الأجسام الصلبة؟

يمثل داخل الجسم الصلب منطقة محظورة، لأن التفاعلات بين الذرات المكونة لجسمين تجعل الطاقة الكامنة عظيمة لجسم في داخل جسم. الأمر أشبه بمحاولة إدخال كلب ثانٍ في بيت يسكنه كلب غير ودود، ستواجه صعوبة في إدخال الكلب الثاني، وإن فعلت، سترى المزيد من الطاقة الفائضة بهيئة نباح وعض.

لكن يمكن للدوال الموجية التمدد إلى المناطق المحظورة حسب ميكانيك الكم، والأجسام الصلبة ليست استثناء، لذا توجد احتمالية صغيرة للعثور على جسم في داخل آخر. علاوة على ذلك يتنبأ ميكانيك الكم باحتمالية -صغيرة- لعبور جسم عبر جسم آخر شريطة أن تكون المنطقة المحظورة صغيرة جدًا، رغم أن الجسم العابر لا يملك طاقة كافية للوصول إلى المنطقة المحظورة، فما بالك بالنفاذ إلى الجانب الآخر.

أوضح مثال عن ذلك إلكترون يصدم قطعة معدن رقيقة ذات طاقة كامنة تزيد عنه بكثير.

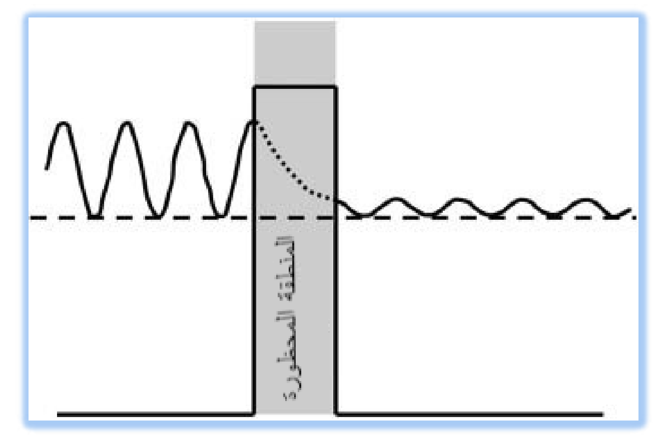
كلاسيكيًا: تحدد الطاقة الحركية للإلكترون ماذا سيحدث عندما يصدم الإلكترون حافة المعدن؛ إن كانت طاقته الحركية كبيرة (أكبر من الطاقة الكامنة للمعدن) فإنه سيحول معظمها إلى طاقة كامنة ويظل يحتفظ بطاقة حركية تكفيه لاختراق المعدن. وإن كانت أصغر من طاقة المعدن الكامنة فلا توجد طريقة لعبور الإلكترون إلا بزيادة طاقته الكلية. ستمثل حافة المعدن نقطة انعطاف في هذا الحال، ويكون المعدن نفسه منطقة محظورة فترتد عن حافته الإلكترونات الآتية من اليسار واليمين.

كميًا: لا يمكن أن تكون هناك نقطة انعطاف قطعية للمعدن. وكما الكرة في مثالنا الأخير، تمتد دالة الإلكترون الموجية إلى المنطقة المحظورة ذات الطاقة الكامنة الأعلى منه. فتكون هناك احتمالية لإيجاد الإلكترون في داخل المعدن، رغم أن الفيزياء الكلاسيكية لا تتيح ذلك وتعدها منطقة محظورة. تكون احتمالية إيجاد الجسيم في المنطقة المحظورة عالية قرب الحافة القريبة منه، وتصغر بسرعة كلما توغلت في المنطقة. وإن كانت المنطقة المحظورة تمتد لمسافة كافية، ستنخفض الاحتمالية إلى الصفر[4] وهنا ينتهي الموضوع.

لكن إن كانت المنطقة المحظورة ضيقة جدًا، ستكون هناك احتمالية لإيجاد الإلكترون في الجهة الأخرى من المعدن. حيث لا توجد منطقة محظورة ويمكن للإلكترون الظهور مجددًا في الفضاء الخالي، والتحرك بذات طاقته الابتدائية. سيشاهد من يراقب التجربة جزءًا ضئيلًا من الجسيمات المنطلقة باتجاه الحاجز -جسيمًا من المليون مثلًا- يعبر من خلال الحاجز كأنه غير موجود. تسمى هذه الظاهرة النفقية أو النفق الكمي، لأن الإلكترونات عبرت المنطقة المحظورة رغم استحالة أن توجد داخلها. الأمر أشبه بعبورها من تحت الحاجز، كما يحفر كلب سيئ تحت سياج.

[4] للدقة، لا تكون الاحتمالية مساوية للصفر أبدًا، فالدالة الرياضية التي تصف الاحتمالية هي دالة أسية، وفي حين أنها تقترب من الصفر باقتراب الإلكترون من الحاجز لكنها لا تبلغ الصفر تمامًا. تتنبأ الفيزياء الكمية باحتمالية ضئيلة لمرور كرة رميت في الجو نفقيًا عبر المنطقة المحظورة (أقصى ارتفاع كلاسيكي ممكن) وصولًا إلى القمر. لكن لا تراهن على حدوث ذلك، فاحتمالية وقوعه ضئيلة جدًا فلا يمكن تفريقها عن الصفر عمليًا.

الدالة الموجية لهذه الحالة الكمية موضحة في الرسم أدناه. يظهر إلى اليسار إلكترون متحرك بزخم وطاقة معينتين، ممثل بموجة ذات طول موجي محدد[5]. حين يصل الإلكترون حافة المعدن، يدخل المنطقة المحظورة فتنخفض الاحتمالية بسرعة. لكنها لا تصل إلى الصفر قبل الطرف الآخر من المعدن، لذا فإن الإلكترون يظهر في الطرف الأيمن بهيئة موجة أخرى بطول موجي يطابق الذي إلى اليسار.



التوزيع الاحتمالي لإلكترون آتٍ من اليسار، ويصدم حاجزًا طاقته الكامنة أكبر من طاقة الإلكترون الحركية. تنخفض الاحتمالية بسرعة في المنطقة المحظورة لكنها لا تبلغ الصفر، لذا هناك احتمالية لإيجاد الإلكترون إلى يمين الحاجز.

يشير الانخفاض في ارتفاع الموجة إلى اليمين إلى أن احتمالية إيجاد الإلكترون هناك أقل بكثير من احتمالية إيجاده إلى اليسار. تتناقص احتمالية حدوث الظاهرة النفقية أسيًا بزيادة سمك الحاجز، أي إن مضاعفة سمك الحاجز تقلل الاحتمالية إلى دون النصف بكثير. من جهة أخرى، تزداد احتمالية إيجاد الإلكترون إلى اليمين بزيادة طاقته الحركية،

---

[5] لاحظ أن الريبة في الموضع كبيرة جدًا؛ يمكن أن يكون الإلكترون في أي مكان إلى يسار المنطقة المحظورة.

لأنها تسمح له أن يخترق المنطقة المحظورة أكثر.

• • •

- إذًا، خلاصة الأمر أن الإلكترونات تحفر ثقوبًا عبر الحاجز؟

- لا، بل تمر عبره كأنه غير موجود من الأصل. فهي لا تمتلك طاقة تمكنها من الحفر والاختراق.

- كيف تعرف ذلك؟

- لأن الإلكترونات تظهر في الطرف الآخر بذات طاقتها الابتدائية. لو أنها حفرت ثقوبًا صغيرة في الحاجز لقلت طاقتها ولو بمقدار ضئيل، ولرصدنا ذلك التغير.

- ألا يحتمل أن تكون الثقوب صغيرة جدًا؟

- لا. لقد تحرينا الأمر بالنظر عبر مجهر المجس الماسح[6]، ولم نجد ثقوبًا.

- ما مجهر المجس الماسح هذا؟

- هذا سؤال مهم، وفي وقته.

---

[6] المجهر الماسح النفقي.

استشعار الذرات المفردة: المجهر الماسح النفقي

للنفقية تطبيقات تقنية أكثر من معظم الظواهر الكمية الغريبة التي استعرضناها. فهي أساس جهاز يسمى المجهر الماسح النفقي، الذي يوظف نفقية الإلكترونات لتصوير أجسام بصغر الذرة. اخترع إرنست روسكا شراكة مع جيرد بينينغ وهاينريخ روهرير من شركة آي بي أم في زيورخ هذا المجهر عام 1981، ونالوا جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1986. بات اختراعهم أداة أساسية لمن يدرس البنية الذرية للمواد الصلبة.

يتألف هذا المجهر من عينة تتكون من مادة موصلة للكهرباء مفصولة عن مجس مدبب جدًا ببضعة نانو مترات. تميل الإلكترونات إلى الانتقال من المجس إلى العينة لأن فرق الجهد بينهما مختلف. لكنها لا تستطيع الانتقال مباشرة لأن الفجوة الصغيرة التي بينهما تعمل حاجزًا يمنع حركة الإلكترونات[7] .

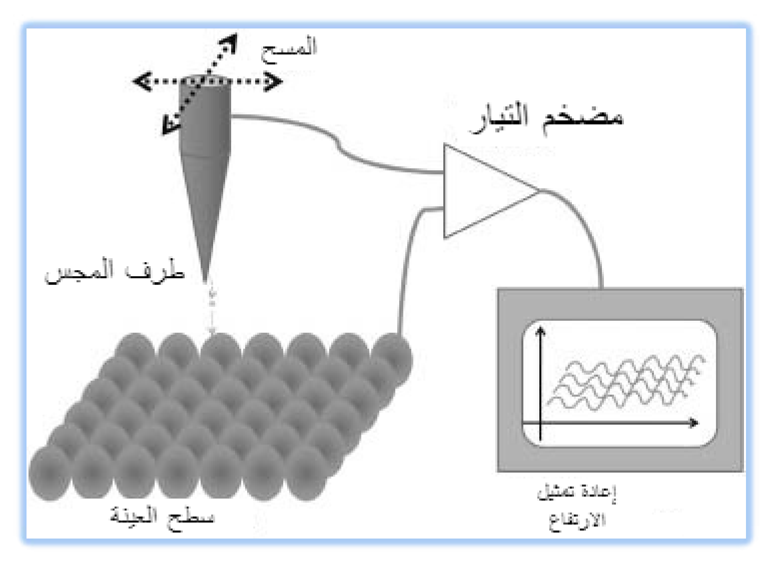
إن صارت الفجوة بين المجس والعينة صغيرة بما يكفي -نحو نانومتر- ستكون هناك احتمالية لانتقال الإلكترونات نفقيًا من المجس إلى العينة. وهذا يسبب تيارًا كهربائيًا صغيرًا يمكن قياسه. تزيد احتمالية النفقية هذه (ثم التيار) بنحوٍ كبير باقتراب المجس من العينة، لذا يمكن الاستدلال بتغير التيار لرصد تغير المسافة بين الاثنين وإن كانت أقل من قطر الذرة.

تشبه عملية التصوير باستخدام المجهر الماسح النفقي تمرير إصبعك على سطحٍ واستشعار ملمسه. إذ إنك تحرك المجس ذهابًا وإيابًا قرب سطح العينة -محافظًا على ذات ارتفاع المجس- وتراقب تغير سريان التيار بين المجس والعينة في أثناء الحركة. سيزيد التيار في كل مرة واجه المجس -في سطح العينة التي يمسحها- نتوءًا يسهل عليه الانتقال نفقيًا؛ ويقل إن

---

[7] ليس بالضرورة أن يكون حاجز الطاقة الكامنة مادة صلبة. فجوة الهواء مثلًا تفي بالغرض. وذلك سبب عدم إنارة المصباح حين تكتفي بتقريبه من المقبس الذي يوضع فيه.

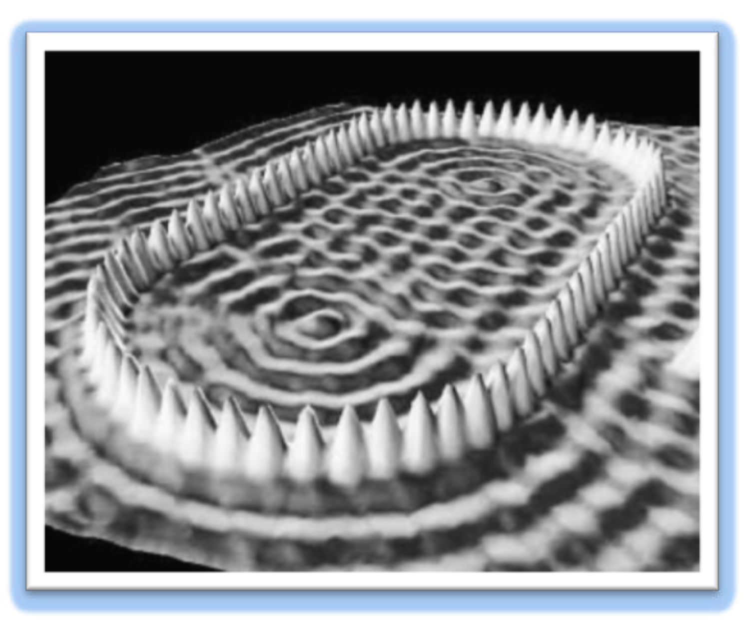
صادف انخفاضًا في السطح. يمكنك عبر أخذ قياسات كثيرة للارتفاعات في نقاط معلومة ضمن شبكة، تجميع هذه البيانات لتشكيل صورة للذرات المفردة المؤلفة لسطح عينتك.



مخطط للمجهر الماسح النفقي. يوضع مجس مدبب قريبًا من سطح عينة، ويحرك ذهابًا وإيابًا بانتظام. تنتقل الإلكترونات نفقيًا عبر الفجوات من المجس إلى السطح، ما يسبب تيارًا كهربائيًا صغيرًا يضخم ويقاس. تعتمد كمية التيار على المسافة بين المجس والسطح بحساسية شديدة تتيح إعادة تشكيل السطح حتى آخر ذراته.

لا يمكنك رؤية الذرات في هذا المجهر وحسب، بل إنك تستطيع دفعها وتحريكها إن لمست السطح بالمجس مباشرة. استخدم العلماء هذه الطريقة لصنع هياكل مذهلة، مثل «الحظيرة» بيضوية الشكل الظاهرة في الصورة التالية؛ النتوءات التي تشكل «الحظيرة» هي ذرات حديد مفردة حركها المجهر الماسح النفقي ووضعها على هذا السطح النحاسي. يمكن أن تستخدم هذه الهياكل لدراسة السلوكيات الكمية للإلكترونات داخل الحظيرة، التي تسبب السمات الموجية الظاهرة في السطح النحاسي. علمًا

أن هذا الإنجاز لمختبر المعدن[8] البحثي لشركة آي بي أم.



ذرات حديد رتبت بشكل حظيرة فوق سطح من النحاس، باستخدام المجهر النفقي الماسح. سبب النمط الموجي داخل الحظيرة هو الطبيعة الموجية لإلكترونات سطح النحاس.

أحدث المجهر النفقي الماسح ثورة في دراسة المواد الصلبة، وقد يؤدي إلى ابتكار تقنية تصنيع جديدة للأجهزة الصغيرة جدًا. ويستخدمه علماء آخرون لدراسة سلاسل منفردة من الدنا والتلاعب بها، ما يوفر فهمًا أعمق لطبيعة المواد الوراثية وربما عقاقير جديدة محتملة أو علاجات لأضرار وراثية. كل هذا بات متاحًا بفضل الطبيعة الموجية الكامنة للمادة.

---

[8] نسبة لمدينة المعدن أو المادن Almaden التي يقع فيها.

- الأمر لطيف وكل شيء، لكني لست مهتمة بالأرانب المجهرية. كيف ينفعني النفق الكمي؟

- مبدئيًا، ما كنتِ لتنعمي بيوم لطيف مشمس لولا ظاهرة النفق الكمي.

- ماذا تعني؟

- حسنًا، الشمس تشع بفضل الاندماج النووي الذي يحدث في مركزها، أليس كذلك؟

- الجميع يعلم ذلك، حتى الكلب البيغل في آخر الشارع يعلم ذلك، وذلك الكلب غبي جدًا.

- على أي حال، يعمل الاندماج النووي بلصق بروتونات الهيدروجين لصنع الهيليوم. لكن البروتونات موجبة الشحنة، لذا فهي تتنافر؛ وهذا التنافر يصنع حاجزًا بينها. وليس للبروتونات في المركز طاقة كافية لعبور الحاجز الذي بينها مباشرة، رغم حرارة الشمس الحارقة.

- أتنتقل نفقيًا إذًا؟

- تمامًا. احتمالية أن ينتقل بروتون نفقيًا ضئيلة جدًا، لكن هناك الكثير الكثير من البروتونات في الشمس، فيعبر منها ما يكفي لاستمرار التفاعل. لذا تضيء الشمس بفضل النفق الكمي في الحقيقة.

- هذا مبهر حقًا!

- سعيد لأنك وافقتِ.

- هل يمكننا لعب لعبة الالتقاط الآن؟

الفصل السابع

نباح شبحي عن بعد: التشابك الكمي

كانت إيمي نائمة في غرفة المعيشة، لكنها استيقظت فور مروري. تمطت ثم تبعتني إلى المطبخ وعلى محياها علامات الرضا، أعلنت «سوف أقيس أرنبًا».

سألتها توضيحًا، فهي كثيرًا ما تقول هذه الأشياء الغريبة.

- لقد اكتشفت طريقة لقياس زخم الأرنب وموقعه في ذات الوقت.

- حقًا؟ ما هي الطريقة؟

- سأضع شبكة خطوط كبيرة في الحديقة، وحين يكون الأرنب فوق أحد مربعاتها لن يكون عليَّ غير قياس السرعة التي يتحرك بها. [قالتها وهزت ذيلها فخرًا]

- حسنًا... وكيف ستقيسين (ترصدين) أن الأرنب فوق أحد مربعات الشبكة؟

- ماذا تعني! سأنظر وحسب.

- ما يعني أنك سترين الأرنب، وهو بدوره سيراك، فيغير سرعته هربًا منك.

- أوه... لم أفكر في ذلك. [انخفض ذيلها خيبة]

- لقد ناقشنا الأمر سابقًا. لا توجد طريقة للالتفاف حول مبدأ الريبة. حاول بعض الأذكياء ذلك وفشلوا. وأمضى آينشتاين سنينًا يناقش الأمر ونيلز بور.

- ألم يجد طريقة لذلك؟

- لقد جرب حججًا مختلفة، فلم تنجح منها واحدة. حتى إنه أتى بحجة ذكية جدًا تقول إن ميكانيك الكم غير كاملة، مستشهدًا بجسيمين متشابكين، مُحضَّرين لتكون حالتاهما مترابطتين.

- مترابطتان؟

- نعم. لنقل إن في يدي مقرمشتين، واحدة بطعم الدجاج والأخرى بطعم اللحم، وأوقفي سيلان لعابك فهذه تجربة فكرية وحسب.

- أحب الدجاج، أحب اللحم. [استمر سيلان لعابها]

- نعم، أعلم. لكنها تجربة فكرية، تذكري.

والآن، تخيلي أني رميت هاتين المقرمشتين باتجاهين مختلفين، إحداهما لك والأخرى لغيرك.

- لا تفعل ذلك. الكلاب الأخرى لا تستحق المقرمشات.

- الأمر افتراضي، فقط حاولي التخيل. على أي حال، إن حصلتِ على قطعة المقرمشات بطعم اللحم، ستعلمين تلقائيًا أن الكلبة الأخرى حصلت على قطعة المقرمشات بطعم الدجاج و... مهلًا، لماذا اكتأبتِ؟

- لأني أحب قطعة المقرمشات الافتراضية بطعم الدجاج.

- لكنك حصلت على قطعة مقرمشات افتراضية بطعم اللحم.

- أوه! أحب اللحم الافتراضي.

- الفكرة هنا أنك تستطيعين معرفة نوع قطعة المقرمشات الأخرى، بقياس قطعة المقرمشات التي حصلتِ عليها.

- وماذا إذًا؟ ما الغريب بشأن ذلك؟

- حسنًا، حالة الجسيمات في المنظور الكمي غير محددة إلى أن تقاس إحداها. أي قبل أن تقيسي إحدى قطعتي المقرمشات التي رميتُها وتكتشفي ما إن كانت بطعم اللحم أو الدجاج، فإنها لا تكون بأي طعم؛ بمعنى آخر، إنها في الحالتين في ذات الوقت.

- دجاج اللحم! لحم الدجاج! لحماج!

- يكفي سخافة. على أي حال، اعتقد آينشتاين أن هذه مشكلة، وأن حقيقة إمكانية التنبؤ بحالة جسيم من قياس حالة جسيم آخر تعني امتلاك الجسيمين قيم محددة طوال الوقت (ليسا في الحالتين معًا).

- هذا الكلام منطقي.

- نعم، في العالم الكلاسيكي. لكن حجة آينشتاين تفشل لأنه افترض ما يسمى «المحلية»؛ والتي تعني أن قياس أحد الجسيمين لا يؤثر في الآخر. والحقيقة أن قياس حالة أحد الجسيمين يحدد حالة الآخر قطعًا وفورًا.

- لا أحب هذه الفكرة. ألا تتطلب أن تسافر رسائل بين قطعتي المقرمشات؟

- هذا الأمر نفسه كدر آينشتاين، فسماه *spukhafte Fernwirkung*.

- تعني التأثير الشبحي عن بعد؟

- منذ متى تجيدين اللغة الألمانية؟

التفت مظهرة لونها الأسود والبني وأنفها المدبب، وقالت: انظر إلي... فصيلة الراعي الألماني، أنسيت؟

- صحيح، يا لسخافتي. على أي حال، نعم لقد كدر الأمر آينشتاين لأن المعلومات لا يمكنها السفر بين الأجسام المنفصلة بسرعة تزيد عن سرعة الضوء في الفراغ. لكن الحقيقة أن ميكانيك الكم نظرية غير محلية والجسيمات المتشابكة تتصرف كجسم واحد.

أظهر رجل يدعى جون بل أن هناك حدودًا لما يمكن قياسه في النظريات التي تقول إن للجسيمات حالات محددة، وهذه الحدود تختلف عن الحدود في النظرية الكمية التي تقول إن الجسيمات تتشابك. لذا أجرى العلماء التجارب اللازمة لمعرفة أي حدود هي الحقيقية، فاكتشفوا أن النظرية الكمية صحيحة: حالات الجسيمات غير محددة إلى أن تقاس.

- هذا يعني أن آينشتاين أخطأ؟

- نعم، في ذلك خصوصًا، وفي أسس النظرية الكمية عمومًا.

- لكن، ألم يكن نابغة؟

- نعم. يمكن القول إن آينشتاين كان أذكى من بور. لكن بور ربح جميع مناقشاتهما، لأنه كان على حق. أنتِ ذكية كذلك لكنك لست آينشتاين. [قلتها وأنا أفرك خلف أذنها]

- لكني أشبه بنسخة كلبية من آينشتاين، أليس كذلك؟

- لا بأس بذلك. أعتقد أنكِ آينشتاين عالم الكلاب.

- إذًا، هل يمكنني الحصول على مقرمشات بطعم اللحم؟ أو الدجاج؟

- ربما.

أخرجت قطعة مقرمشات من الإناء ورميتها من الباب الخلفي قائلًا: ستكتشفين عندما تقيسينها. هرولت خلفها وهي تهتف: عظيم! مقرمشات غير محددة!

• • •

كان كل ما تحدثنا عنه إلى الآن ظواهرَ متعلقة بجسيم واحد. احتجنا في معظمها إلى تكرار التجارب مرات كثيرة باستخدام جسيمات منفردة مختلفة مجهزة بذات الطريقة لنرى تأثيرات تلك الظواهر؛ لكن في المستوى الجوهري، يمكن حدوث كل تأثيرات القياس والتداخل والحيود التي تحدثنا عنها في كل جسيم واحد منفرد. يمكن التفكير في كل جسيم في تجربة التداخل بأنه يتداخل مع نفسه، ويمكن عدّ ظاهرة القياس -مثل تأثير زينون الكمي- بأنها تتضمن حالة جسيم منفرد[1].

---

[1] تتضمن عملية فك الترابط (شرحناها في الصفحة 106) تفاعل الجسيم الكمي المنفرد مع بيئة أضخم بكثير، لكننا لا نهتم بغير حالة الجسيم المنفرد.

لكننا نحتاج إلى النظر فيما يحدث عند تطبيق الفيزياء الكمية على نظام يتضمن أكثر من جسيم واحد، لأن في عالمنا الكثير الكثير من الجسيمات. وليس بمفاجئ أن نجد ونحن نطبق ذلك حدوث بعض الأشياء الغريبة بدءًا من فكرة «الحالات المتشابكة».

سنتحدث في هذا الفصل عن الجسيمات المتشابكة، التي تكون حالاتها مترابطة فيحدد قياسُ أحدها الحالةَ الدقيقة للآخر. تمثل الجسيمات المتشابكة أساس أشد طعن قدمه آينشتاين في النظرية الكمية، والمعروف بمفارقة آينشتاين وبودولسكي وروزن (مفارقة إي بي آر). وسنتحدث أيضًا عن مبرهنة جون بل الشهيرة في حل هذه المفارقة، وما انطوت عليه من إرباك لنظرتنا المنطقية الفطرية للعالم. وأخيرًا، سنتحدث عن التجربة التي أكدت مبرهنة بل ونبين مدى محاربة الفيزيائيين للأفكار الجديدة.

الكلاب النائمة تسمح لبعضها بالاستلقاء: التشابك والترابط

يتمحور التشابك حول الترابطات بين حالات جسيمين. سأستعين بالكلب آردي اللابرادور وهو لوالديَّ، والكلب ترومان من فصيل بوسطن تيرير وهو لأصهاري لأوضح هذه الفكرة؛ يمكن لكل من هذين الكلبين أن يكون في إحدى حالتين: «مستيقظ» أو «نائم». ويحتمل إن كانا منفصلين عن بعضهما رصدهما في واحدة من أربع حالات محتملة: كلاهما مستيقظ، أو كلاهما نائم، أو ترومان مستيقظ وآردي نائم، أو ترومان نائم وآردي مستيقظ.

لكن، إن وضعنا الكلبين معًا وسمحنا لهما بالتفاعل، سينشأ ترابط بين حالة الكلبين، فإن كان ترومان نائمًا وآردي مستيقظًا، سيوقظ آردي ترومان ليلعبا معًا، والعكس صحيح. لذا لن ترصد الكلبين إلا وهما نائمان كلاهما، أو مستيقظان كلاهما. ما يعني أننا انتقلنا من أربع حالات محتملة إلى حالتين محتملتين وحسب.

علاوة على ذلك، يتيح لنا هذا الترابط معرفة حالة أحد الكلبين دون قياسه. فإن كان ترومان مستيقظًا سنعرف أن آردي مستيقظ حتمًا، وإن كان ترومان نائمًا سنعرف أن آردي نائم قطعًا. يمكننا النظر إلى آردي إن أردنا، لكن لن يقدم لنا ذلك غير تأكيد لما نعلم. بالنتيجة: ينبئنا قياس حالة أحد الكلبين بحالة الكلب الآخر فورًا وأكيدًا.

ما علاقة هذا بآينشتاين؟

كان آينشتاين مؤمنًا شديدًا بكون محدد يمكن تتبع كل شيء فيه من السبب إلى الأثر. وعانى مشاكل فلسفية بخصوص ميكانيك الكم؛ خصوصًا فيما يتعلق بفكرة أن خواص الجسيمات الكمية غير محددة إلى أن تقاس فتتخذ قيمًا عشوائية في لحظتها.

استبسل آينشتاين في الجدل مع نيلز بور، بطل النظرية الكمية الميال للفلسفة[2]، منذ أواخر عشرينيات القرن الماضي حتى منتصف ثلاثينياته. طعن آينشتاين بدايةً في فكرة الريبة بعدد من التجارب الفكرية العبقرية، التي كانت تتيح قياس أشياء محظورة في مبدأ الريبة منها قياس موقع إلكترون وقياس زخمه في ذات الوقت. لكنه ما طعن مرة إلا صده بور بحجة مضادة نصف كلاسيكية كاشفًا الوهن في كل مقترح لآينشتاين[3].

تقبل آينشتاين في بداية ثلاثينيات القرن الماضي مبدأ الريبة، لكنه تحفظ على باقي النظرية الكمية ووجد فيها مشكلة جديدة اتخذها هدفًا. لقد قال بعدم احتواء النظرية الكمية -عندئذ- على المعلومات الكافية لوصف خصائص الجسيمات. وطرح مع زميليه بوريس بودولسكي وناثان روزن في العام 1935 ورقة بحثية بعنوان «هل يمكن عدّ وصف ميكانيك الكم للواقع الفيزيائي كاملًا؟»؛ وكانت حجتهم عبقرية استغلوا فيها فكرة الحالات المتشابكة.

---

[2] وصفه فيرنر هايزنبيرغ، الذي طوّر مبدأ الريبة في أثناء عمله معه، أنه «فيلسوف بالدرجة الأولى، لا فيزيائي».

[3] استندت حجة بور في كل الحالات تقريبًا إلى تأثير القياس في النظام. إذ يسبب شيء ما في العملية التي اقترحها آينشتاين لقياس الموقع تغيّرًا في الزخم والعكس صحيح (كما في تجربة مجهر هايزنبيرغ الفكرية التي شرحناها في الصفحة 51). باختصار: يستلزم قياس النظام تفاعلًا معه، والتفاعل معه يغير حالته فتطرأ ريبة على الكميات المقاسة.

اقترحوا تجربة تثبت عدم الكمال المزعوم ذاك، تُشابّك فيها حالة جسيمين ثم يُفصلان عن بعضهما لينقطع التفاعل بينهما (مع الحفاظ على حالتيهما). بعد ذلك، تقاس خصائص الجسيمين في تجارب منفصلة لا تؤثر بعضها في بعض ونرى النتيجة.

يتيح لك قياس موقع أحد الجسيمين (وليكن أ) في مخطط إي بي آر التنبؤ بموقع الجسيم الثاني (ب) بدقة ناهية. وإن قست في ذات الوقت زخم الجسيم ب، ستعرف زخم الجسيم أ بدقة مثالية. وفقًا لآينشتاين وبودولسكي وروزن: بسبب استحالة أن تؤثر القياسات التي نجريها للجسيم أ في القياسات التي نجريها للجسيم ب (والعكس صحيح)، فإن قيمة زخم كل جسيم وموقعه يجب أن تكون محددة طوال الوقت.

يشير هذا إلى أن ميكانيك الكم ناقصة، لأن المعلومات اللازمة لوصف حالة الجسيمات موجودة أصالةً لكنها غائبة عن النظرية الكمية.

• • •

- هذا ما كنت أقوله بالضبط!

- ماذا؟

- يملك الأرنب موقعًا محددًا وسرعة محددة بالفعل. ولا تعدو أشياء الريبة تلك على أن تكون بسبب أنك مُحيِّر وما شابه.

- يبدو كلامك مقنعًا، لكني -لو تذكرين- قلت إنه خطأ رغم أنه أنيق. يوجد عيب في افتراضات إي بي آر، وهو فكرة استحالة أن تؤثر القياسات المجراة لأحد الجسيمين في حالة الجسيم الآخر.

- أوه، هل هذا خاطئ حقًا؟ هات برهانك.

- اقترب وقته، فلا تستعجلي.

«لا أعلم» أم «لا يمكن العلم»؟: المتغيرات الخفية المحلية

كان رد بور الأول على مفارقة إي بي آر متسرعًا وغير مفهوم تقريبًا[4] لكنه نقحه لاحقًا. رغم ذلك لم يستطع الإتيان بحجة مضادة نصف كلاسيكية كما كان يفعل في مناظراته السابقة مع آينشتاين. والسبب يسير: لعدم وجود هكذا رد. فميكانيك الكم نظرية غير محلية، ما يعني أن القياسات المفصولة بمسافات شاسعة تؤثر في بعضها. وهذا غير مألوف في الفيزياء الكلاسيكية التي لا تسمح بهذا التأثير.

يسمى نوع النظريات التي يفضلها آينشتاين وبودولسكي وروزن بنظريات المتغير الخفي المحلي (LHV)، تيمنًا بالافتراضات الضمنية للنموذج: يعني «المتغير الخفي» أن لجميع الكميات القابلة للقياس قيمًا محددة، لكنها غير معروفة (خفية) لمجري التجربة؛ ويعني «المحلي» أن القياسات والتفاعلات في نقطة من الفضاء لا يمكنها التأثير فوريًا إلا في الأشياء في محيطها. نعم يمكنها التأثير في الأشياء الأبعد، لكن تأثيرها ليس فوريًا، بل يستغرق انتقال التفاعلات وقتًا، بسرعة تساوي سرعة الضوء في الفراغ أو تقل عنها[5].

---

[4] كان بور مشهورًا نوعًا ما بغموض كتاباته، ولقد استحقها في هذه الحالة. إذ وصف -في بحثه- الاتصال الكمي بين الجسيمات المتباعدة بكونه «تأثيرٌ في جوهر الحالات التي تحدد أنواع التنبؤات المحتملة للسلوك المستقبلي للنظام»، وأعلن أن الصورة الكمية «يمكن تصنيفها أنها انتفاع منطقي بكل احتمالات التفسير البيِّن للقياس، متوافق والتفاعل المحدود غير القابل للسيطرة بين الأجسام وأدوات قياس النظرية الكمية».

[5] حد سرعة الضوء هو من الآثار الأساسية لنظرية آينشتاين النسبية، لذا فهو مهم جدًا لفهمه الفيزيائي.

تبدو فكرة المحلية أوضح من أن يشكك فيها لأنها أساسية للفيزياء الكلاسيكية. إنها تقول بوجوب أن يمضي وقت بين السبب والأثر. مثلًا، حين ينادي شخص على كلبة في الحديقة، فإن الكلبة لن تأتيه راكضة إلا بعد أن يمر وقت يكفي لانتقال صوته وصولًا إليها[6]. ولا يمكن لأي كلمات يقولها الفرد التأثير في أفعال الكلبة قبل ذلك الوقت.

المحلية هي ما يجعل حجة إي بي آر مفارقة. إذ لا يوجد ما يحد الزمن بين القياسين في التجربة المقترحة. يمكنك وضع الجسيم أ في برينستون وإرسال الجسيم ب إلى كوبنهاغن، والاتفاق مع زميلك على أن تقيسا موضع الجسيم أ وزخم الجسيم ب بعد نانو ثانية واحدة من منتصف النهار حسب التوقيت الشرقي القياسي. لا يمكن أن تسافر أي معلومة من برينستون إلى كوبنهاغن في الوقت الكافي للتأثير في عملية قياس الجسيم الآخر. لذا -على افتراض صحة المحلية- فإن القياسين مستقلان تمامًا ويجب أن يكشف كل منهما جزءًا من الواقع.

ورغم أن المحلية أوضح من أن نفترض وجودها، فإنها هي ما يفشل الحجة في الحقيقة. الميكانيك الكمي نظرية غير محلية، يؤثر فيها القياس المجرى لأحد جسيمين متشابكين في القياس المجرى لجسيم آخر فورًا بغض النظر عن البعد بينهما. لذا يمكن لقياس في برينستون أن يحدد نتيجة قياس في كوبنهاغن، شريطة أن يكون الجسيمان متشابكين.

تظل حالة الجسيمين المتشابكين غير محددة إلى أن يقاس أحدهما، بسبب لامحلية ميكانيك الكم. أي إنك لا تعرف الحالة التي فيها الجسيمات المتشابكة، ولا يمكنك أن تعلم حتى تقيسها. بالعودة إلى مثالنا عن الكلبين (في الصفحة 164)، فإن الكلبين يكونان نائمين ومستيقظين في ذات الوقت إلى أن يقيسهما (يرصدهما) أحد ما؛ بمعنى أن

---

[6] ربما أطول، اعتمادًا على ما تفعل الكلبة في أثناء النداء.

الدالة الموجية لنظامهما تتألف من جزء «ترومان نائم وآردي نائم» وجزء «ترومان مستيقظ وأردي مستيقظ» لكن لا أحد منهما نائم أو مستيقظ على نحوٍ محدد. الكلبان في حالة تراكب كمي، إنهما نسخة ألطف من تجربة قطة شرودنغر.

لا تكون حالة كلب بقيمة محددة إلى أن يقاس، وفقط حينها تتحدد حالة الكلب الآخر وعلى الفور. أي إنك تحدد حالة كلا الكلبين في اللحظة التي تقيس فيها حالة أحدهما، بغض النظر عن موقعيهما؛ إن كان ترومان مستيقظًا فكذلك هو آردي، والعكس صحيح. وإن وضعتهما في غرفتين مختلفتين قبل قياس حالتيهما فإنك ستظل تجدهما مترابطين، بغض النظر عن حقيقة أن قياس وضع ترومان لا يؤثر في آردي بنحوٍ مباشر، ولا تنتقل أي معلومة بينهما. يمثل الكلبان المنفصلان نظامًا كميًا واحدًا، وقياس أي جزء من هذا النظام سيؤثر فيه كله.

تمنع اللامحلية تجربة إي بي آر من كسر مبدأ الريبة. إذ سيغير قياس الجسيم أ حالة الجسيم ب، كأن القياس أجري للجسيم ب مباشرة. هذا صحيح بغض النظر عن الدقة في فصل الجسيمين قبل القياس، فالجسيمات المتشابكة هي نظام كمي واحد غير محلي.

تسبب اللامحلية مشكلة فلسفية للعلوم الكلاسيكية، عويصة ومكدرة بقدر مشاكل الاحتمالية والقياس التي شرحناها في الفصلين الثالث والرابع. الحلول الفوري للأجسام المتشابكة في حالات محددة[7] هو استنتاج يجبرنا عليه الميكانيك الكمي، وليس مثله شيء في الميكانيك الكلاسيكي.

[7] إن تفضل تفسير كوبنهاغن، فهذا الحلول يتضمن انهيارًا حقيقيًا للدالة الموجية إلى حالة واحدة. وإن تفضل تفسير العوالم المتعددة، فهذا الحلول الظاهري إلى حالة واحدة ينتج لأننا نتسلم فرعًا واحدًا وحسب من الدالة الموجية. الترابط الذي ينتج هو نفسه في الحالتين، والتأثير فوري.

بلغت الفيزياء الكمية طريقًا فلسفيًا مغلقًا بفضل ورقة إي بي آر. إذ لم يقتنع أنصار النظرية الكمية التقليدية لبور بحجة إي بي آر لكنهم عجزوا عن تقديم حجة مضادة ناجعة. في حين أشار أمثال آينشتاين المتضايقين من آثار النظرية الكمية إلى حجة إي بي آر لاقتراح نظرية أعمق تجعل أشياء الكمية الغريبة وغير السارة منطقية. نصر الناس بور أكثر من آينشتاين، لأن النظرية الكمية قدمت تنبؤات دقيقة جدًا للخواص الذرية، رغم ذلك لم يأت أي من الفريقين بتجربة حاسمة.

حسم الذي فيه تبحثان: مبرهنة بل

استمرت هذه الورطة الفلسفية زهاء الثلاثين عامًا، حتى وجد الفيزيائي الإيرلندي جون بل طريقة للتفريق بين تنبؤات النظرية الكمية ونظريات المتغير الخفي المحلي التي فضلها آينشتاين. أدرك بل أن نظريات المتغير الخفي المحلي محدودة أكثر من النظرية الكمية، لأنها ذات حالات جسيمات محددة وتفاعلات محلية وحسب. وأثبت مبرهنة رياضية تنص على إن حالات الجسيمات المتشابكة مترابطة في النظرية الكمية بطرائق تفوق طرائق الترابط المتاحة في أي من نظريات المتغير الخفي المحلي. يمكن قياس هذه الترابطات تجريبيًا؛ فإن أظهر القياس وجود ترابطات تفوق حدود نظريات المتغير الخفي المحلي، فقد ثبت خطأ آينشتاين وصحة بور بنحوٍ قاطع.

تستحق مبرهنة بل أن نسبر أغوارها لأنها شديدة الأهمية للفهم الحديث لميكانيك الكم. ورغم عدم إمكانية إثباتها باستخدام الكلاب مثالًا، فإن الأمر ليس صعبًا بتوظيف الفوتونات التي شرحناها في الفصل الثالث (الصفحة 80). لذا لنأخذ فوتونين اثنين متطابقين في الاستقطاب، بمعنى إن كان الأول مستقطبًا أفقيًا فالثاني مستقطب أفقيًا، وإن كان الأول مستقطبًا بزاوية 45° فالآخر مثله. ولننظر في ثلاثة قياسات مختلفة محتملة.

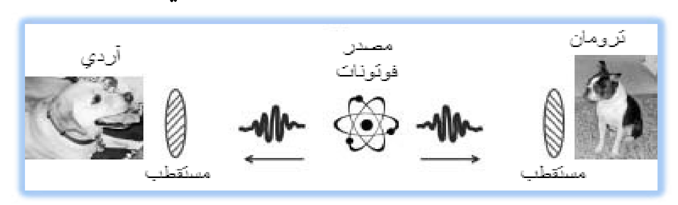
الترتيب التقليدي للتجربة هو بوضع شخصين يتسلم كل منهما أحد الفوتونين، عادة ما يسمى هذين الشخصين آليس وبوب لكننا سنكمل مع ترومان وآردي لأنهما كلبان جيدان. سنعطي كل منهما مستقطبًا وراصد فوتونات، يشكلان معًا جهاز رصد يسجل «1» إن مر الفوتون عبر المستقطب و«0» إن لم يمر الفوتون عبر المستقطب.

على سبيل المثال، إن ضبطنا المستقطب عموديًا سيمر الفوتون المستقطب عموديًا من خلاله فيسجل الراصد 1، ولن يمر الفوتون

المستقطب أفقيًا لأنه سيحجب، فيسجل الراصد 0. وإن ضبطنا المستقطب بزاوية 45° ستكون احتمالية مرور الفوتون المستقطب عموديًا وتسجيل الراصد قيمة 1 تساوي 50%، عدا هذا سيحجبه المستقطب فيسجل الراصد 0.

والآن إلى التجربة الفعلية: يضبط كلُ كلبٍ المستقطب الذي لديه بزاوية من ثلاث زوايا هي ألف وباء وتاء. ثم يسجل قيمة الراصد لكل فوتون (أسجل 1 أم 0). ثم يغيران ضبط المستقطب (يغيران الزاوية) ويعيدان العملية.

بإعادة التجربة مرارًا وتكرارًا سيكونان جربا -أكثر من مرة- جميع التراكيب الممكنة لزوايا المستقطب، ثم يقارنان النتاجات التي حصلا عليها.



مخطط قياس لاختبار مبرهنة بل. يتسلم كل من ترومان وآردي فوتونًا من مصدر فوتونات متشابكة، ويقيسان استقطابه بزاوية من الثلاث زوايا باستخدام مستقطب وجهاز راصد. يمكنهما التفريق بين نظرية ميكانيك الكم ونظرية المتغير الخفي المحلي عبر حساب كم مرة سجلا ذات القيمة عندما كان مستقطباهما بزوايا مختلفة.

سيلاحظان عند مقارنة النتاجات شيئين: أولًا، أنهما دائمًا يسجلان ذات القيمة (واحد أو صفر) عندما يكون المستقطبان مضبوطين بالزاوية نفسها. ثانيًا، أنهما يسجلان أعدادًا متساوية من قيم واحد وصفر بغض النظر عن الزاوية التي يختارانها، بمعنى أنهما إن كررا التجربة ألف مرة بزاوية معينة فإنهما سيسجلان 500 صفر و500 واحد. هاتان الملاحظتان صحيحتان سواء كنت تتعامل مع حالة تشابك كمي أو حالة محكومة بنظرية متغير خفي محلي.

- مهلًا، ألا يجب أن يعتمد عدد القيم المسجلة على الزوايا؟

- أي زوايا؟

- زوايا ألف وباء وتاء التي اخترتها. لماذا تسجل الكلاب ذات القراءة من 1 و0؟ ألا يجب أن تعتمد نتيجة التجربة على الزاوية المختارة؟ مثلًا، إن ضبطا المستقطب عموديًا يرصدان 1 دائمًا؟

- لا، لأن الحالات التي نتعامل معها هي حالات استقطاب غير محدد. الاستقطاب غير معرَّف في الصورة الكمية، أما في نظرية المتغير الخفي المحلي فيحتمل أن يكون أفقيًا بقدر ما يحتمل أن يكون عموديًا.

- ألا يعني هذا أن الفوتونات بزاوية 45°؟ لذا، ألا يجب أن يسجل الراصدان قيمة 1 في كل مرة يكون المستقطب بزاوية 45°؟

- لا، إنهما يسجلان ذات النتيجة في زاوية 45°. لأن احتمالية أن يكون الفوتون مستقطبًا بزاوية 45° مع عقارب الساعة أو بزاوية 45° عكس عقارب الساعة، أو أي زاوية أخرى متساوية. لا يهم حقًا أي قيمة زاوية نختار لألف وباء وتاء، حتى «العمودي» و«الأفقي» قيم اعتباطية نوعًا ما.

- لا، إنها ليست كذلك.

- بلى هي كذلك. حين أقول شيئًا غريبًا وتنظرين إليَّ جانبيًا كما تفعلين الآن، ألا يغير ذلك كيف يبدو «العمودي» بالنسبة لك؟

- أعتقد. يختلف كل شيء باختلاف الزوايا، وأشياء الإنسان الغريبة تكون أكثر منطقية أحيانًا.

- الأمر نفسه هنا. تحدد الزوايا المضبوط بها المستقطب معنى قيمة 1 وصفر، بذات الطريقة التي تغير بها إمالة رأسك معنى الاتجاه الأفقي والعمودي وفقًا لك؛ لكن ما زالت الاحتمالية متساوية لتسجيل أي من القيمتين. ما ترينه يعتمد على ما تريدينه. عودة إلى تشبيهنا في الصفحة 160، الأمر أشبه بمقرمشات ستكون بطعم شريحة اللحم أو الدجاج إن كنت تبحثين عن اللحم؛ وبطعم الفستق السوداني أو الجبن إن كنت

تبحثين عن غير اللحم.

- تبدو هذه المقرمشات لذيذة. ينبغي لك أن تشتري لي منها.

- سأبحث عنها، لكني لا أعتقد أنها موجودة في متجر الحيوانات الأليفة.

• • •

لاختبار مبرهنة بل، نبحث في عدد المرات التي نحصل فيها على ذات النتيجة عندما تكون معدات الرصد بزوايا مختلفة. بمعنى، كم مرة سجل ترومان 0 عندما كان راصده بزاوية ألف، وسجل آردي 0 وراصده بزاوية تاء؛ أو كم مرة سجل ترومان 1 عندما كان راصده بزاوية باء وآردي 1 وراصده بزاوية ألف، وهكذا. احتمالية تحصيل كلا الكلبين ذات النتيجة عند زوايا الرصد المختلفة تختلف كثيرًا في نظرية المتغير الخفي المحلي عنها في ميكانيك الكم.

خيار إي بي آر: تنبؤ نظرية المتغير الخفي المحلي

يتمثل مفتاح مبرهنة بل في إمكانية تدوين جميع تنبؤات أي نظرية متغير خفي محلي مقدمًا، لذا لنفعل ذلك. لكل فوتون حالة محددة يمكننا تمثيلها بثلاثة أرقام، كل رقم منها هو نتيجة الرصد عندما يكون المستَقطِب بوضع ألف أو باء أو تاء. بالنتيجة، يوفر نظام الفوتونين ثماني حالات ممكنة كما في الجدول:

	ترومان			آردي		
الحالة	ألف	باء	تاء	ألف	باء	تاء
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	1	0
3	1	0	1	1	0	1
4	1	0	0	1	0	0
5	0	1	1	0	1	1
6	0	1	0	0	1	0
7	0	0	1	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0

لاختبار مبرهنة بل، نحتاج إلى معرفة احتمالية تسجيل الكلبين ذات النتيجة عندما يختلف ضبط المستقطب (تكون الزوايا مختلفة). نجد بالنظر إلى الجدول أن نصف الحالات الممكنة ستعطي ذات النتيجة، بغض النظر عن الزاوية التي نختارها للمستقطب. مثلًا إن وضع ترومان مستقطبه بوضع ألف ووضع آردي مستقطبه بزاوية باء فإن الحالتين 1 و2 ستكونان بقيمة 1، وستكون الحالتان 7 و8 بقيمة 0. وإن اختار ترومان زاوية تاء وآردي زاوية ألف، فإن الأربع حالات التي تعطي ذات النتيجة هي 1 و3 و6 و8، وهلم جرا.

لذا نرى -مبدئيًا- أن احتمالية قياس ذات النتيجة عند اختلاف الزوايا تساوي 50%، لكن هذه ليست نتيجة نهائية حتمية؛ لأننا نستطيع تغيير احتمالية كون الفوتون في إحدى الحالات الثمان (مثل أن نرفع احتمالية كونه في الحالة 1 ونقلل احتمالية كونه في الحالة 6). رغم أن أي تغيير نحدثه سينتهي باحتمالية متساوية لتسجيل رقم 1 و0 لكل زاوية للمستقطب.

نجد من تلاعبنا باحتمالية الحالات المفردة أننا نستطيع تغطية عدد محدود من الاحتماليات الممكنة. فيمكننا جعل أقصى احتمالية لقياس الكلبين ذات النتيجة تساوي 100%، لكننا لا نستطيع جعل أقل احتمالية تقل عن 33% تقريبًا، أي ليست صفرًا. لا يمكننا جعل الاحتمالية أقل من 33% مهما فعلنا[8].

لاحظ أننا لم نقل شيئًا عما يسبب هذه الحالات ولا كيفية اختيارها. لا نحتاج إلى ذلك، فمجرد حقيقة أننا نستطيع كتابة العدد المحدود من النتاجات المحتملة تضع قيودًا على التجربة. لا يمكن لأي نموذج يكون فيه الفوتونان بحالات محددة حين يغادران المصدر أن يعطي احتمالية تقل عن 33% لأن يكون القياسان بذات القيمة. بالنتيجة: في جميع نظريات المتغير الخفي المحلي الممكنة، يجب أن تكون الاحتمالية تساوي أو تقل عن 100%، وتساوي أو تزيد عن 33%[9].

---

[8] نحصل على القيمة القصوى (100%) إن كان النظام يحتمل أن يكون في الحالة 1 بنسبة 50% ويحتمل أن يكون في الحالة 8 بنسبة 50%. ونحصل على القيمة الأدنى (33%) بعدم جعل النظام يكون في الحالة الأولى أو الثامنة وجعل الحالات الباقية متساوية في الاحتمالية. إن نظرت إلى الحالات من 2 إلى 7، سترى أن هناك حالتين تنتجان ذات النتيجة لكلا الراصدين دائمًا، بغض النظر عن الزوايا المختلفة المختارة (بمعنى أن حالة واحدة ستختلف من كل ثلاث حالات).

[9] نتيجة لذلك غالبًا ما تسمى تنبؤات مبرهنة بل «تباينات بل».

خيار بور: تنبؤ الميكانيك الكمي

حسب ما تقدم، نجد أن إثبات صحة ميكانيك الكم منوط بتعديل زوايا المستقطب فتصبح احتمالية تسجيل الكلبين ذات الاستقطاب عند الزوايا المختلفة أقل من 33%. بين بل إمكانية فعل هذا بفضل التشابك، حيث يحدد قياسُ (رصد) استقطابِ أحد الفوتونين استقطابَ الفوتون الآخر فورًا.

حالة الفوتونين غير محددة في الصورة الكمية إلى لحظة قياس أحدهما. وفي لحظة القياس، ستطابق حالة استقطاب الفوتون الثاني حالة استقطاب الفوتون الأول، بغض النظر عن قيمتها. فإن مر الفوتون الأول عبر مستقطب عمودي مسجلًا 1 سيكون الفوتون الثاني مستقطبًا عموديًا كذلك. وإن حجب المستقطب العمودي الفوتون الأول مسجلًا 0 فإن الفوتون الثاني سيكون مستقطبًا أفقيًا. وهكذا تحدد زاوية المستقطب الأول ما سينتج من قياس استقطاب الثاني.

لإثبات مبرهنة بل، لنتخيل أن ترومان ضبط مستقطبه بزاوية استقطاب عمودي (لنرمز لها ألف). ونتخيل أن ترومان ضبط مستقطبه بزاوية 60° من المحور العمودي باتجاه عقارب الساعة (ولنرمز لها باء) أو بزاوية 60° من المحور العمودي بعكس اتجاه عقارب الساعة (ولنرمز لها تاء). ما الطرائق الممكنة لتحصيل الكلبين نفس النتيجة عندما تكون زوايا مستقطبيهما مختلفة؟

في نصف المرات، سيرصد ترومان 1، ما يعني أننا نريد معرفة احتمالية آردي لتحصيل 1[10]. وبما أن مستقطب ترومان عمودي، سيكون الفوتون المتشابك الذي يضرب راصد آردي مستقطبًا عموديًا. إن كان

---

[10] حرصًا على الوضوح، افترضنا أن فوتون ترومان يرصد أولًا. والنتيجة ذاتها إن افترضنا أننا نرصد فوتون آردي قبله.

مستقطب آردي بالزاوية باء فإن الزاوية بينه وبين الفوتون العمودي تساوي 60° واحتمالية مرور الفوتون عبر المستقطب تساوي 25%. وذات الاحتمالية للوضع تاء، الذي كذلك يبعد 60° عن الزاوية ألف لكن في الاتجاه الآخر.

وفي النصف الآخر، سيرصد ترومان 0 (يحجب الفوتون)، وكلا الفوتونين مستقطب أفقيًا. واحتمالية أن يرصد آردي 0 تكون 25% لكلا الزاويتين الممكنتين (وضع باء وتاء)[11].

ما تخبرنا به النظرية الكمية هو إن هناك احتمالية قدرها 25% لأن يرصد آردي عند زوايا المستقطب المختلفة (باء وتاء) ذات القيمة التي رصدها آردي، بغض النظر عن مقدارها (سواء 1 أو 0). وهذا يناقض تمامًا تنبؤات نظرية المتغير الخفي المحلي التي تنص على إن أدنى احتمالية لا تقل عن 33%.

نجد إذًا أن قياسًا واحدًا من كل أربع قياسات يجريها آردي يطابق قياس ترومان، في حين تنص نظرية المتغير الخفي المحلي على إن قياسًا من بين كل ثلاثة قياسات يجب أن يتطابق في الأقل.

قد تعتقد بوجوب أن تنتج النظريتان نفس النتاجات لأنهما تصفان ذات النظام؛ أي كما تعطي تفسيرات ميكانيك الكم المختلفة ذات التنبؤات. وهذا ما اعتقده الفيزيائيون حتى أثبت بل العكس. الافتراض الرئيس في نظريات المتغير الخفي المحلي يعني أنها محدودة بحدود صارمة (يمكنك إعداد جدول يظهر جميع الحالات الممكنة، مثل الذي أعددناه قبل قليل). أما ميكانيك الكم فليس فيه ذات الحدود، لذا ستفرق التجربة

---

[11] احتمالية مرور الفوتون المستقطب أفقيًا عبر المستقطب إلى الراصد هي 75% في كلا الوضعين. واحتمالية أن يرصد الراصد صفرًا ليتطابق الرصد مع رصد ترومان يتحقق فقط عندما يحجب فوتون آردي، هذا يعني أن قدرها 25%.

الذكية بين الاثنين[12].

سبب اختلاف النتاجات هو كون ميكانيك الكم نظرية لامحلية، حيث استقطاب فوتون آردي غير محدد مسبقًا بل يُحدَد حسب نتيجة قياس (رصد) ترومان. وتكون احتمالية تحصيل ذات النتيجة بإعدادات مختلفة (زوايا مختلفة) أقل لأن القياسين يؤثران في بعضهما، بغض النظر عن الفرق المكاني أو الزمني بين الرصدين. أطلق آينشتاين على هذا التأثير بالشبحي، ومن الصعب أن نجادله في هذا.

• • •

- ألا يمكنك صنع نظرية أفضل وحسب؟

- أي نوع من نظرية أفضل؟

- نظرية متغير خفي محلي. تطابق التنبؤات أكثر.

- هذه هي النقطة الرئيسة. لم ينظر بل في نظرية بعينها، ما أثبته استحالة أن تنتج أي نظرية متغير خفي محلي جميع التنبؤات التي تنتجها ميكانيك الكم. لو كان القياسان مستقلين عن بعضهما حقًا، لاستحال ترتيب الأشياء فتُظهِر القياسات ذات الترابط الذي نراه في ميكانيك الكم.

- إذًا اجعل القياسين يعتمدان على بعض (غير مستقلين).

- نعم يمكن أن يعمل هذا، لكنه لن يجعل النظرية نظرية متغير خفي محلي. في الحقيقة، ابتكر ديفيد بوم نسخة من ميكانيك الكم فيها متغير خفي غير محلي وأنتج جميع تنبؤات ميكانيك الكم باستخدام جسيمات ذات مواقع وسرعات محددة!

- يبدو هذا جيدًا! لم لا يستخدمها الناس؟

---

[12] هذا يجعلنا نتساءل هل تستطيع تجربة ذكية بما يكفي التفريق بين تفسير كوبنهاغن وتفسير العوالم المتعددة مثلًا؟ التفريق بينهما أصعب من التفريق بين النظرية الكمية ونظرية المتغير الخفي المحلي، ولا نعرف طريقة لفعل ذلك حاليًا؛ لكن ربما يجد جون بل مستقبلي سبيلًا لذلك.

- لأن نظرية بوم تنتج شيئًا إضافيًا يعرف بالجهد الكمي، وهو دالة تمتد عبر الفضاء كله وتتغير فور أن نغير خاصية في التجربة. إنها شيء غريب بحق، وتسبب صداعًا عند الحساب. علاوة على ذلك، من الأسهل تمديد ميكانيك الكم الاعتيادي فيتوافق مع النسبية فيما يعرف بنظرية المجال الكمي.

- لكنها ليست نظرية خاطئة؟

- نعم، إنها تتنبأ بما يتنبأ به ميكانيك الكم. يمكنك عدها نسخة متطرفة من التفسيرات الكمية، مثل تفسير كوبنهاغن أو العوالم المتعددة التي تحدثنا عنها سابقًا. إنها تضيف رياضيات أكثر للنظرية لكنها لا تتنبأ بشيء مختلف عمليًا.

- مم...

- المهم هنا أن نظرية بوم غير محلية، وهذا ما تتمحور حوله مفارقة إي بي آر ومبرهنة بل. ونعرف منها أن النظرية الكمية لا يمكن أبدًا أن تكون نظرية محلية حيث لا تؤثر القياسات في مكانين مختلفين في بعضهما البعض.

- ما زال هذا يزعجني. كيف نعرف أن ذلك هو ما يحدث حقًا؟

- سعيد بسؤالك...

• • •

المثال السابق هو إثبات محدد لمبرهنة بل، لكن فيه نكهة المبرهنة العامة. ما أُثبته بل أن هناك حدودًا لما يمكن تحقيقه باستخدام نظريات المتغير الخفي المحلي، ويمكن في بعض الظروف أن تتجاوز ميكانيك الكم تلك الحدود. يمكن أن تحدد تجربة ذكية، بنحوٍ لا يقبل النقاش، ما إن كانت ميكانيك الكم صحيحة أو يمكن أن تستبدل بنظرية متغير خفي محلي كما أمل آينشتاين.

الفحوص المختبرية والثغرات: تجارب أسبيه

نشر بل مبرهنته الشهيرة في العام 1964. واختبرها الفيزيائي الفرنسي آلان أسبيه وزملاؤه في العامين 1981 و1982 بسلسلة من ثلاث تجارب أقصت نظريات المتغير الخفي المحلي كما هو سائد[13]. تطلب الأمر من الفريق جميع التجارب الثلاث لإغلاق عدة ثغرات قد تنفذ منها بعض نظريات المتغير الخفي المحلي.

سنشرح جميع التجارب الثلاث في هذه الصفحات، لأنها أمثلة رائعة عن فن الفيزياء التجريبية. علاوة على أنها تبين المدى الذي يجب أن تذهب إليه إن أردت إقناع الفيزيائيين بشيء. فليس عليك حل الاعتراضات الجلية وحسب، بل حتى الاعتراضات السخيفة غير المحتملة.

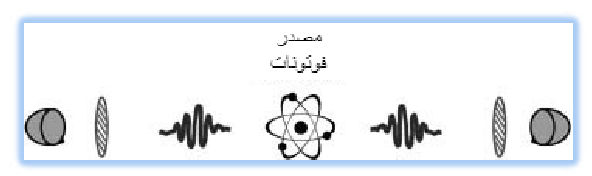
تشابه أول تجربة نشرت في العام 1981 في جوهرها تجربتنا التي وظفنا فيها ترومان وآردي. حفّز فريق أسبيه ذرات كالسيوم لتشع فوتونات باتجاهات متعاكسة بفرق زمني بينها يقدر بالنانو ثانية. هذه الفوتونات متطابقة في الاستقطاب فيطابق الفوتون الثاني الفوتونَ الأول سواء كان مستقطبًا أفقيًا أو عموديًا أو أي زاوية أخرى، واحتمالية كون الفوتون مستقطبًا بأي زاوية متساوٍ تمامًا. وهذه هي حالة التشابك المطلوبة لاختبار مبرهنة بل.

في التجربة الأولى، وضع الفريق راصدين اثنين يسبقهما مستقطبين في جهتين متعاكستين من مصدر الفوتونات المتشابكة الخاص بهم (ذرات الكالسيوم). ضبط الفريق المستقطبين بمختلف الزوايا، وأحصوا عدد المرات التي رصد فيها كلا الراصدين فوتونًا (حسب تجربتنا السابقة، هذا يعني عدد المرات التي سجل فيها الراصد قيمة 1).

---

[13] أجرى جون كلوزر وغيره من الناس اختبارات قبل أسبيه، لكن دقة تجارب أسبيه أفضل، لذا تعد تجاربه هي الحاسمة.

سنشرح التجربة بالأرقام لأن الفيزيائيين يحبون التعامل بها: فيما يخص الزوايا التي استخدمها الفريق للمستقطبين، تقول نظريات المتغير الخفي المحلي إن النتيجة النهائية يجب أن تتراوح بين -1 و0. وحين أجروا التجربة وجدوا النتيجة تساوي 0.126! بهامش خطأ ضئيل قدره 0.014[14]. نرى أن الفرق بين أقصى قيمة تسمح بها نظريات المتغير الخفي المحلي وبين نتيجة تجربتهم أكبر بتسع مرات من هامش الخطأ في التجربة، ما يعني أن احتمالية كون هذه النتيجة مصادفة قدرها 1 من 10^{36} (مليار مليار مليار مليار).



أول تجربة لأسبيه: ذرة كالسيوم مثارة تشع فوتونين بقطبية متشابكة. كل منهما يتجه نحو راصد واحد يتقدمه مستقطب مضبوط بزاوية معينة.

يبدو أن هذه هي نهاية نظرية المتغير الخفي المحلي، أليس كذلك؟ إنها تشبه كثيرًا تجربتنا التخيلية قبل قليل، واحتمالية أن تكون النتيجة بالصدفة ضئيل جدًا جدًا كما رأيت. فلماذا عزز الفريق نتاجاته بتجربة ثانية فثالثة؟

سبب ذلك وجود ثغرة صغيرة يمكن أن تنفذ من خلالها بعض نظريات المتغير الخفي المحلي. تخيلنا في تجربتنا الفكرية أن لترومان وآردي أجهزة رصد بكفاءة ممتازة لأنهما كلبان جيدان يستحقان ذلك. أما أسبيه وزملاؤه فإنهم مجرد بشر في تجربة واقعية، لذا من المقبول ألا تكون أدوات الرصد خاصتهم ممتازة الكفاءة. لذا يحتمل أن يفشل جهاز الرصد في رؤية فوتون وتسجيله رغم وجوده، وإن كان ذلك نادر الحدوث.

---

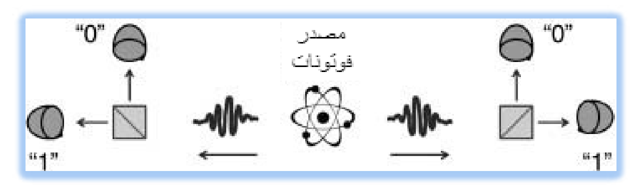
[14] عدم الدقة هذا هو حد تقني نتج بسبب تفاصيل تجربتهم، وليس له علاقة بمبدأ الريبة لهايزنبيرغ.

تمثل تلك الكفاءة غير الممتازة مشكلة، لأن تجربتهم ربما سجلت 0 (الذي يعني أن الفوتون حجب) حين توقعوا مرور الفوتون (لذا افترضوا أن المستقطب حجب تلك الفوتونات). ولأن الراصدين المستخدمين فشلا في رصد الفوتونات في بعض الأحيان، من الممكن أن تكون تجربة أسبيه الأولى بدت كأنها انتهكت تنبؤات نظريات المتغير الخفي المحلي، والحقيقة غير ذلك. إذ لو كانت بعض الأصفار التي سجلوها واحدًا في الحقيقة، فإن ذلك سيشوه النتاجات.

من الصعب أن تنفذ نظريات المتغير الخفي المحلي من هكذا ثغرة صغيرة، لكن الأمر ليس مستبعدًا. لذا أجرى الفريق تجربة ثانية في العام 1982 استخدموا فيها جهازي رصد لكل فوتون.

في هذه التجربة، أقصى الفريق أي خطأ قد يحدث بسبب عدم كفاءة الراصد عن طريق رصد كلا الاستقطابين الممكنين مباشرةً. لقد استبدلوا المستقطِبَين بمفرق شعاع مستقطِب يوجه كل فوتون مستَقطَب إلى الراصد الخاص به. وأخذوا بالحسبان التجارب التي رصدت فوتونًا في راصد واحد من كلا الجهتين المتعاكستين وحسب، وأهملوا أي تجربة لم يسجل فيها أحد الراصدين فوتونًا.

رصدوا في التجربة الثانية نتاجات تجاوزت الحدود التي تسمح بها نظريات المتغير الخفي المحلي بأربعين ضعف هامش الخطأ، واحتمالية أن يحدث ذلك مصادفةً لضئيلة دون ما تتخيل.



تجربة أسبيه الثانية: يتجه كل فوتون منطلق من ذرة الكالسيوم المثارة إلى راصدين يتقدمهما مفرق شعاع مستقطب. يوجه مفرقي الشعاع استقطاب «0» نحو أحد الراصدين، ويوجه استقطاب «1» نحو راصد آخر، لضمان عدم إهمال أي فوتون.

لماذا إذًا أجروا تجربة ثالثة؟

رغم جودة التجربة الثانية، فإن فيها ثغرة تتمثل في إمكانية أن تُرسَل رسائل بين أجهزة الرصد التي استخدموها وبين المصدر!

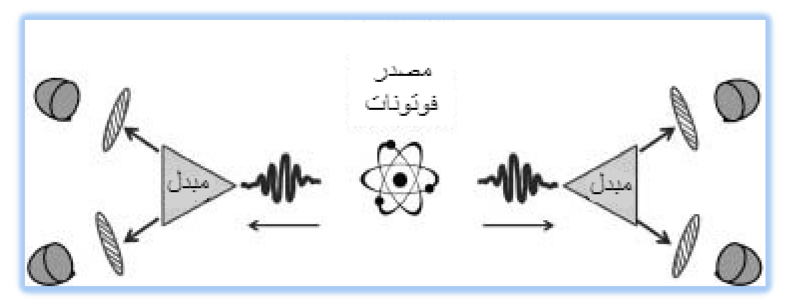
لإثبات مبرهنة بل، يجب أن يستحيل أن يعتمد القياس في الراصد الأول على القياس في الراصد الآخر إلا بتفاعل أسرع من الضوء. ستفشل المبرهنة إن وجدنا أن الرسائل تنتقل بين المصدر وأجهزة الرصد بسرعة تساوي أو تقل عن سرعة الضوء.

اختار الفريق في التجربتين السابقتين إعدادات أجهزة الرصد مسبقًا (إعدادات المستقطب ومفرق الشعاع) وتركوها نفسها مدة أطول من الوقت اللازم لانتقال الضوء بين المصدر وجهاز الرصد. لربما نقل شيء ما إعدادات المستقطب إلى المصدر! فأرسل المصدر فوتونات بقيمة استقطاب محددة (وهذا يدعم نظرية المتغير الخفي المحلي) مختارة تطابق التنبؤات الكمية. وحين غير الفريق زوايا الاستقطاب انتقلت القيم الجديدة إلى المصدر الذي غير استقطاب الفوتونات التي يشعها. في هذه الحالة، ربما بدت نتاجاتهم تبرهن صحة النظرية الكمية والحقيقة أنهم ضحايا مؤامرة كونية!

احتوت التجربة الثالثة على طريقة عبقرية لإغلاق هذه الثغرة. لقد أقصى أسبيه وزملاؤه أي احتمالية لمؤامرة كونية تحاكي النتاجات الكمية، وذلك بتغيير إعدادات الراصد (بضمنه المستقطب) أسرع من الوقت اللازم لقطع الضوء المسافة بين المصدر والراصد.

استبدل الفريق مفرق الشعاع بمفاتيح ضوئية سريعة (مبدلات) توجه الفوتونات نحو راصد من اثنين، كل منهما مسبوق بمستقطب مختلف. تبدل المفاتيح وضعها كل 10 نانو ثانية في حين يستغرق الضوء 40 نانو ثانية ليصل إلى الراصد. عمليًا هذا يعني أن الراصد الذي سيصدمه الفوتون لا يحدد إلا بعد أن ينطلق الفوتون من المصدر.

تجاوزت نتاجات النظرية الثالثة حدود نظرية المتغير الخفي المحلية بنسبة أكبر بخمس مرات من هامش الخطأ. واحتمالية حدوث ذلك مصادفة تقدر بنحو 1 من مئة مليار!



تجربة أسبيه الثالثة: يتجه الفوتونان المتشابكان المنطلقان من المصدر إلى مبدلات توجه كل منهما نحو أحد المستقطبين، ولا يحدد إلى أي مستقطب سيتجه الفوتون إلا بعد أن يغادر المصدر.

ظلت هناك ثغرات لم تغلق حتى في التجربة الثالثة[15] لكن أسبيه توقف عندها لصعوبة إجراء التجارب. كرر بعض اللاحقين هذه التجارب باستخدام مصادر فوتونات متشابكة أكثر تطورًا[16] حتى إن تجربة أجريت في العام 2008 اختبرت مبرهنة بل باستخدام أيونات متشابكة الحالة عوضًا عن فوتونات. لكن لم تجر تجربة خالية من الثغرات حتى اللحظة. لذا ما زال هناك بعض من يجادلون أن نظريات المتغير الخفي المحلي لم تستبعد بالكامل.

---

[15] يجدر الذكر أن التجربة الثالثة تعيد ثغرة عدم كفاءة الراصد، لأنها تستخدم راصدًا واحدًا لكل مستقطِب.

[16] أجرى بول كويات وزملاؤه إحدى هذه التجارب (علمًا أنه كان جزءًا من فريق إنسبروك في لوس ألاموس، الذي أجرى تجربة الاستجواب الكمي المذكورة في الفصل الخامس) وكانت النتيجة مذهلة، فقد تجاوزت هامش الخطأ بمئة مرة!

خلا القلة من أولئك النظريين المتزمتين، توافق الأغلبية الساحقة من الفيزيائيين على أن تجارب مبرهنة بل التي أجراها أسبيه ورفاقه أثبتت بنحوٍ لا لبس فيه أن ميكانيك الكم نظرية لامحلية. لا يمكن أن يوصف كوننا بأي نظرية تقول إن للجسيمات خواص محددة دائمًا، وإن القياسات المجراة في مكانٍ لا يمكن أن تتأثر بقياسات تجرى في مكان آخر.

تمثل تجارب أسبيه هزيمة ساحقة لنظرة العالم التي فضلها آينشتاين وقدمها ورفاقه في ورقة آينشتاين وبودولسكي وروزن العلمية في العام 1935. لكن مع أن ورقة إي بي آر خاطئة، فإنها تجبر الفيزيائيين على التصارع والآثار الفلسفية المترتبة على اللامحلية. لقد عمَّق سبر أغوار الأفكار في ورقة إي بي آر فهمنا للطبيعة الغريبة لكوننا الكمي. وتبين أن التشابك الكمي المستغل في تلك الورقة يتيح لنا فعل أشياء رائعة بتوظيف الطبيعة اللامحلية للواقع الكمي.

• • •

- الفيزيائيون عجيبون.

- نعم، اللامحلية عجيبة.

- ليس ذلك، بل الثغرات. أحقًا يعتقد الفيزيائيون بإمكانية أن تنتقل الرسائل ذهابًا وإيابًا بين أدوات الرصد التي يستخدمونها؟ ما الذي سينقل الرسائل؟

- لا أعرف أحدًا اقترح هكذا آلية، لكن هذا غير مهم ولا يحدث فرقًا. ولو قلنا إن أرانب كمية خفية تنقلها.

- أرانب كمية؟

- أرانب كمية خفية. تتحرك بسرعة الضوء. فلا ترفعي سقف طموحاتك.

- يا لحظي...

- على أي حال، يمكن القول إن تجربة أسبيه الثالثة تستبعد أي وسيلة يمكن أن تنتقل بها الرسائل بين أجهزة الرصد، سواء أرانب كمية أو سواها. وتلك الإمكانية كانت في أقل تقدير موجودة قبل أن يدحضها أسبيه. وعليك استبعاد جميع التفسيرات المحتملة في العلوم، حتى الغريبة منها، إن أردتِ إقناع الناس بفكرة استثنائية.

- حتى التي فيها أرانب؟

- حتى التي فيها أرانب. ثم إن فكرة أن تستطيع الجسيمات البعيدة الترابط بطريقة لامحلية ليست أعجب كثيرًا من فكرة الأرانب الكمية.

- أحسنت القول. على أي حال، ما فائدة ذلك؟

- ماذا تعنين؟

- لقد أشرت في آخر فقرة إشارة واضحة إلى أن أشياء التشابك تلك مفيدة. فيما هي مفيدة؟ بإرسال الرسائل أسرع من الضوء؟

- لا. لا يمكن استخدامها لنقل الرسائل أسرع مما يفعل الضوء لأن القياسات عشوائية. نعم هناك ترابط بين الجسيمات، لكن استقطاب كل زوجين منها عشوائي. لا يمكنني إرسال رسالة إلى شخص آخر باستخدام ترابطات إي بي آر، بل كل ما يمكن إرساله سلسلة أرقام عشوائية.

- ما فائدتها إذًا؟

- يمكن أن تكون سلاسل الأرقام العشوائية مفيدة في التشفير الكمي، لصنع رموز لا يمكن فكها. علاوة على أن التشابك أساسي في الحوسبة الكمية، التي تستطيع حل مسائل تعجز الحواسيب التقليدية عن حلها. أيضًا هناك الانتقال الفوري الكمي، وهو استخدام التشابك الكمي لنقل الحالات من مكان إلى آخر. هناك الكثير من الفوائد لمن يبحث عنها.

- يبدو الانتقال الفوري رائعًا! تحدث عنه!

- لك ذلك، وهو التالي.

الفصل الثامن

أرسل إليّ أربنًا: الانتقال الفوري الكمي

دخلت إيمي مكتبي مهرولةً وعلى محياها علامات الرضا عن النفس. وهذه ليست بشارة خير. خصوصًا أنها أعلنت «لدي خطة!».

سألتها عن الخطة ولأي شيء هي. فقالت: خطة لصيد تلك السناجب المزعجة.

كانت السناجب تهرب من إيمي متسلقة الأشجار في الحديقة، حتى بدأ الإحباط يصيبها.

- أهذه الخطة أفضل من سابقتها؟ حين قررتِ أنك ستتعلمين الطيران بأكل الحبوب الساقطة من مغذية الطيور.

قالت بسخط: تلك الخطة كانت ستنجح لعلمك. ونعم هذه أفضل بكثير.

- حسنًا، كلي أذان مصغية! ما هذه الخطة المحكمة؟

- الانتقال الفوري. [قالتها بخيلاء، وهزت ذيلها بشدة]

- الانتقال الفوري؟

- نعم.

- حسنًا، عليك شرحها لي قليلًا.

- كنت أفكر... المشكلة هي.. يمكن للسناجب رؤيتي حين أخرج من المنزل نحوها، فتتسلق الأشجار قبل أن أصل إليها. لكني إن استطعت أن أكون بينها وبين الأشجار، سأمسكها قبل أن تهرب.

- لا بأس، أتفق معك في هذا.

- لذا، أحتاج فقط إلى نقل نفسي فوريًا إلى الحديقة، عوضًا عن الخروج من الباب.

- صحيح... وكيف بالضبط ستتمين هذا العمل الفذ؟
- في الحقيقة... آمل أن تساعدني في ذلك.
-أنا؟
- نعم. قرأت أن هناك فيزيائيين نجحوا في عملية النقل الفوري الكمي، وأنت فيزيائي، وجهبذ، وتعرف نظرية الكم، لذا كنت آمل أن تساعدني في بناء آلة نقل فوري.
ووضعت رأسها في حضني وأضافت: ساعدني أرجوك، أنا كلبة جيدة.
فركت خلف أذنها وقلت: أنت كلبة جيدة بالفعل، لكني عاجز عن المساعدة لسببين: الأول لأني لا أجري تجارب النقل الفوري في مختبري، والثاني لأني حتى إن كنت أجريها، لن أستطيع مساعدتك في استخدام الانتقال الفوري لصيد السناجب.
- لماذا؟
- لأن جميع تجارب الانتقال الحالية تقتصر على جسيمات مفردة، عادة ما تكون فوتونات. وأنت متكونة من نحو مئة تريليون تريليون ذرة (10^{26}) وهذا أكثر بكثير من أي عدد نقل سابقًا.
- نعم، لكنك ذكي جدًا. يمكنك فقط، جعلها أكبر.
- مع تقديري لثقتك فإني لا أستطيع. علاوة على أن النقل الفوري الكمي الحقيقي ليس كالذي ترينه في أفلام الخيال العلمي مثل ستار تريك.
- كيف ذلك؟
- يقتصر النقل الفوري الكمي على نقل حالة جسيم من مكان إلى مكان آخر. على سبيل المثال، إن كانت لدي ذرة هنا فإني أستطيع «نقلها فوريًا» إلى الحديقة، فتكون في الحديقة ذرة بحالة كمية تطابق حالة الذرة التي لدي هنا. لكن في نهاية العملية، ستظل الذرة الأصلية في ذات مكانها، أي إنها لا تنتقل من مكان إلى آخر.

- أي تفاهة هذه! ما الفائدة منه؟

- حسنًا، لا يسمح لنا ميكانيك الكم بصنع نسخة طبق الأصل عن حالة ما دون تغيير الحالة الأصلية، والحالات الكمية لأشياء مثل الذرات هشة جدًا. لذا إن احتجت إلى نقل حالة كمية معينة من مكان إلى مكان آخر فإن أفضل طريقة لذلك قد تكون بنقلها فوريًا.

رأيت قلبها لم يطمئن بعد، فأضفت:

يمكنك استغلاله لصنع نسخة كمية من الإنترنت، إن كان لديك حاسوبان كميان تريدين توصيلهما معًا.

- إذًا، فقط انقل حالتي إلى الحديقة، وسأستغل ذلك لأصيد الأرانب.

- حتى إن كنت أعرف كيف أشابك حالتك مع مجموعة من الفوتونات - وأنا لا أعرف- فإني سأحتاج إلى مواد خام في الحديقة. بعبارة أخرى: يجب أن تكون هناك كلبة في الحديقة، كلبة تشبهك تمامًا.

سكن ذيلها فجأة وقالت: نحن لا نحب تلك الكلاب، الكلاب التي تبدو مثلي. في حديقتي. لا نحب تلك الكلاب بتاتًا.

- نعم نحن لا نحبها. أنتِ تغنيني عن سائر الكلاب.

على أي حال، هكذا ترين أن خطة الانتقال الكمي الفوري ليست جيدة.

- نعم، ليست جيدة.

ران الصمت على المكان، وبدت عليها سيماء المفكرين، ثم قالت: هذا يعني أني سأعود إلى الخطة ألف.

- الخطة ألف؟

- هل لي ببعض حبوب الطيور؟

لعل الانتقال الفوري الكمي أكثر التطبيقات المعروفة للترابطات غير المحلية التي ناقشناها في الفصل السابق. هذا الاسم الرنان قطعًا يحرك المخيلة، فتستحضر صورًا من ستار تريك والمشاهد الخيالية الأخرى حيث يستطيع الناس -سواء بالخيال العلمي أو السحر المحض- نقل الأشياء فوريًا من مكان إلى مكان آخر. يبدأ الجسم في الموقع الأول، ثم يختفي فجأة ويظهر في الموقع الثاني البعيد.

جعلت الطموحات العالية للخيال العلمي حقيقة الانتقال الفوري الكمي تبدو مخيبة للآمال. فلا يشتمل النقل الفوري الكمي الواقعي إلا على نقل الحالة الكمية من مكان إلى آخر، لا نقل الجسم نفسه. وهو يحدث بسرعة لا تزيد عن سرعة الضوء لأن المعلومات يجب أن ترسل من مكان إلى آخر. هذه خيبة أمل كبيرة للكلاب التي تتمنى إرسال نفسها إلى أماكن تواجد السناجب الغافلة.

على الرغم من ذلك، الانتقال الفوري الكمي هو استغلال عبقري للنظرية الكمية، ويربط عدة مواضيع سبق أن تكلمنا عنها. سنرى في هذا الفصل كيف يُصعِّب عدم التحديد والقياس الكمي نقل معلومات الحالات الكمية من مكان إلى آخر. وسنرى أيضًا كيف يَستغل «الانتقال الفوري الكمي» مبدأ اللامحلية والحالات المتشابكة بطريقة عبقرية يتجنب بها المشاكل سابقة الذكر، ولماذا نريد تجنبها.

لعل الانتقال الفوري الكمي أصعب ما في هذا الكتاب، فهو موضوع معقد ودقيق. لكنه أيضًا أفضل مثال عن غرابة الفيزياء الكمية وقدرتها.

الاستنساخ عن بعد: «الانتقال الفوري» الكلاسيكي

لا يمكننا الانتقال فوريًا بالطريقة التي أوهمنا بها الخيال العلمي وأحلامه، لكن الانتقال الفوري الحقيقي يشبه في جوهره الاستنساخ عن بعد، إذ تأخذ جسمًا في مكان معين وتستبدله بنسخة مطابقة في مكان آخر. حسب هذا التعريف، لدينا تقريب للانتقال الفوري في الفيزياء الكلاسيكية يتمثل في جهاز الفاكس (الناسوخ).

يمكنك استخدام هذا الجهاز لإرسال نسخة من مستند من مكان إلى آخر على الفور. على سبيل المثال، إن كان لترومان عظمة جميلة يود إغاظة آردي بصورتها.

يعمل جهاز الفاكس بمسح المستند وتحويله إلى إشارات كهربائية ترشد الجهاز الآخر إلى طريقة صنع نسخة مطابقة منه، ثم يرسل هذه الإشارات عبر خطوط الهاتف إلى جهاز فاكس آخر بعيد يطبع نسخة من المستند الأصلي. ما نُقل هنا ليس المستند نفسه، بل المعلومات التي تبيّن طريقة صنع نسخة منه.

تختلف آلية عمل جهاز الفاكس عن فكرة الانتقال الفوري الخيالية، لكن الاختلاف ليس كبيرًا. نعم أنت تحصل على نسختين من المستند حين تنقله من مكان إلى آخر عبر الفاكس، لكن إن عددت هذه مشكلة فيمكنك إرفاق آلة تقطيع ورق بجهاز الفاكس المُرسِل لتتلف النسخة الأصلية. ونعم ليست النسخة التي ينتجها جهاز الفاكس مثالية، لكن سبب ذلك دقة الماسح والطابعة، ويمكنك دومًا الحصول على ماسح وطابعة أفضل. علمًا أن هذا الانتقال ليس فوريًا تمامًا، لأنه محدود بالوقت الذي تستغرقه المعلومات لتنتقل بين الجهازين، لكن هذه ليست بمصيبة لمعظم الانتقالات المعتمدة على جهاز الفاكس.

إن أردت تمثيل فكرة الانتقال الفوري الخيالية واقعيًا بأفضل طريقة، فإن أفضل ما بالإمكان تطوير مبدأ عمل جهاز الفاكس فيصبح التالي: يضع ترومان عظمته في جهاز الفاكس المطوَّر، فيمسح الجهاز العظمة على المستوى الذري لتحديد ترتيب ذراتها وجزيئاتها. ثم يرسل المعلومات التي جمعها إلى «جهاز الانتقال الفوري» الخاص بآردي، الذي سيشكل عظمة مطابقة للأصلية من المواد المتوفرة، ويقدمها له ليمضغها.

لا يسمح بالنسخ: القيود الكمية

حين نتمعن في الانتقال الفوري الكمي، فنحن نتكلم عن «نقل فوري» لجسم كمي. هذا لا يعني مجرد نقل الترتيب الفيزيائي الصحيح لذرات الجسم وجزيئاته، بل نقل جميع الحالات الكمية لجسيماته، بضمنها حالات التراكب.

يستطيع ترومان استخدام جهاز فاكس مطوَّر لإرسال قطة في صندوق إلى آردي، لكنه يحتاج إلى جهاز نقل فوري كمي لينقل قطة باحتمالية أن تكون 30% حية و30% ميتة و40% غاضبة بشدة. هذا أصعب كثيرًا من التشبيه الكلاسيكي، بسبب الطبيعة المؤثرة للقياس.

لم تنقل التجارب العملية غير الفوتونات إلى اليوم، رغم أن النظرية تتيح نقل أي جسم كميًا، لذا سنتخيل أن ترومان يود إرسال فوتون واحد باستقطاب معين إلى آردي[1].

كما رأينا سابقًا في الفصل الثالث، يمكن عد الفوتون المستقطب في حالة تراكب بين الاستقطاب الأفقي والعمودي، باحتمالية إيجاده في أي من هاتين الحالتين المسموح بهما.

حين نصف فوتونًا باستقطاب بين العمودي والأفقي، فإننا نكتب دالة موجية للفوتون في حالة تراكب، يمثل جزئها الأول احتمالية أن يكون الفوتون مستقطبًا عموديًا (a) وجزئها الثاني احتمالية أن يكون الفوتون مستقطبًا أفقيًا (b)، كالتالي:

$$a\ |V> + b\ |H>$$

[1] سنتحدث عن لماذا قد يرغب في فعل شيء غريب كهذا في نهاية الفصل.

تنبئنا قيم a وb باحتمالية كون الاستقطاب عموديًا أو أفقيًا. في الحقيقة، يوصف أي جسم في حالة تراكب بدالة موجية مطابقة للدالة السابقة. وإن وجدنا طريقة لنقل استقطاب فوتون من ترومان لآردي، فإننا نستطيع استخدام ذات الطريقة لنقل حالة قطة في صندوق؛ فلا يتجاوز الفرق بين الاثنين غير زيادة الجسيمات التي سننقلها.

على أي حال، لترومان فوتون يريد إرساله إلى آردي. ترشده الوصفة الكلاسيكية إلى أن عليه قياس استقطاب الفوتون، ثم الاتصال بآردي هاتفيًا وإخباره كيف يعد حالة مطابقة. لكن السبيل الوحيد ليقيس ترومان استقطاب الفوتون يلزم أن يعرف شيئًا عن الحالة، فيضبط راصد الاستقطاب بما يلائم ذلك. مثلًا إن كان يعرف أن الفوتون إما مستقطب عموديًا وإما أفقيًا، يمكنه إرساله عبر مستقطب عمودي، فإن مر عبره علم أن استقطابه عمودي وإن لم يمر علم أنه مستقطب أفقيًا. ثم يرسل ما علم إلى آردي ليعد فوتونًا بحالة مطابقة.

لكن لسوء الحظ، إن كان استقطاب الفوتون في زاوية بينية -الجزء a من الدالة عمودي، والجزء b أفقي- لن يستطيع ترومان إجراء القياس المطلوب. تنبئنا قيم a وb باحتمالية مرور الفوتون عبر المستقطب الأفقي أو العمودي، لكن ليس هناك سبيل لرصد كلا القيمتين لفوتون واحد، فإما أن يمر عبر المستقطب وإما ألا يمر. وحتى إن مر الفوتون فإن حالة التراكب ستنهار فيصبح في حالة واحدة مسموح بها.

لا يمكن تحديد قيم كلا الاحتماليتين إلا بتكرار التجربة مرات عديدة باستخدام فوتونات متطابقة. لكن هذا لا يساعدنا فيما نهدف إليه من نقل استقطاب فوتون مفرد.

مشكلة قياس الاستقطاب هذه هي مثال خاص عن «مبرهنة منع النسخ». أثبت ويليام ووترز وفويتشخ زوريخ في العام 1982 أن من المستحيل صنع نسخة مثالية من حالة كمية غير معروفة. لأن الحالة الأصلية ستتغير في أثناء قياسها، لذا لن تستطيع معرفة إن كنت قد استنسختها بدقة إلا إن كنت تعلم شيئًا عنها من الأساس. لذا إن أراد ترومان أن يرسل لآردي نسخة طبق الأصل عن فوتون مفرد، دون أن يعلم استقطابه مقدمًا، عليه إيجاد طريقة ذكية لذلك.

• • •

- لماذا لا يرسل الفوتون مباشرة؟

- عذرًا؟

- أعني، إنه فوتون. وظيفة هذه الأشياء أن تسافر عبر الأماكن بسرعة الضوء. إن كان لدي فوتون أريد إرساله لكلب آخر -وأنا لا أريد بالمناسبة؛ الكلاب الأخرى لا تستحق فوتوناتي- سوف أوجه الفوتون في اتجاه الكلب الآخر وأتركه يرحل.

- يمكن أن تحدث الكثير من الأشياء للفوتون في أثناء رحلته من مكان لآخر، فتغير من استقطابه. النقل الفوري هو أفضل طريقة لضمان تسلم الكلب الآخر استقطاب الفوتون الأصلي.

- هذا شيء سخيف لأحرص عليه.

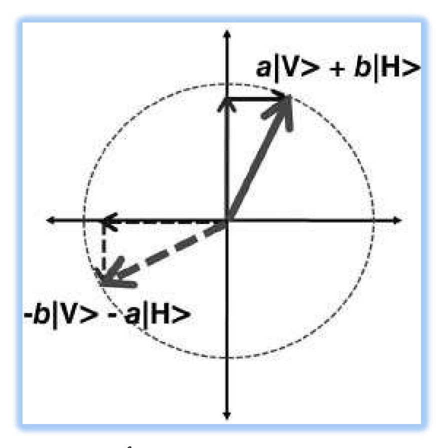
- ليس حقًا. انتظري لنهاية الفصل لتعرفي لماذا.

بوصلة سحرية: المثيل الكلاسيكي للانتقال الفوري الكمي

يصعب تمثيل النقل الفوري الكمي على نحوٍ مثالي في الفيزياء الكلاسيكية، لأن مشاكله غير كلاسيكية في جوهرها. لكنناً نستطيع تمثيله جزئيًا بتخيل عملية الانتقال الفوري للفوتون بطريقة بيانية، فنرى -ولو لمحًا- ما يتطلبه النقل الفوري الكمي.

كما رأينا في الفصل الثالث (صفحة 81)، يمكننا تمثيل استقطاب الفوتون بسهم يشير إلى اتجاه الاستقطاب. عادّين المتجهات العمودية والأفقية عدد الخطوات اللازم قطعها في الاتجاهات المختلفة: a هي عدد الخطوات في الاتجاه العمودي، وb هي عدد الخطوات في الاتجاه الأفقي.

في هذه الصورة البيانية، نختزل مشكلة الانتقال الفوري بأسهم نريد جعلها محاذية لبعضها. لترومان سهم موجه باتجاه معين، وسيحصل كلا الكلبين على شريحة لحم إن استطاع آردي جعل سهمه يشير إلى ذات الاتجاه. فكيف يمكن فعل ذلك؟



تمثيل قطبية الضوء بمجموع متجهات عمودية وأفقية. تمثل الأسهم الأكبر حالتي فوتون مختلفتين، في حين تمثل الأسهم الأصغر المتجهات الأفقية والعمودية.

السبيل الوحيد ليؤشر الكلبان سهميهما إلى ذات الاتجاه هي إن كان لهما مرجع مشترك. على سبيل المثال إن امتلك كلاهما بوصلة، يمكن لترومان حينها مقارنة سهمه بإبرة بوصلته، فيخبر آردي أن يغير اتجاه سهمه إلى 17° شمالًا مثلًا. توفر البوصلة مرجعًا يشتركان فيه، ويتطلب أي نقل فوري للفوتون مرجعًا مشابهًا.

رغم ما تقدم، مشكلة نقل الفوتون فوريًا أكبر من مجرد جعل الأسهم بذات المحاذاة، بسبب مبرهنة منع النسخ. إذ لا يمكن أن يقيس ترومان اتجاه سهمه دون أن يغيره. عليه بطريقة ما أن ينقل اتجاه سهمه إلى آردي دون أن يقيسه. إنه يحتاج إلى مرجع لامحلي، إلى شيء مثل بوصلة سحرية تنقل الاتجاه إلى بوصلة آردي دون قياس. لحسن الحظ، وبفضل التشابك الكمي الذي شرحناه في الفصل السابق، فإن الانتقال الفوري الكمي ممكن، لأن التشابك يوفر نوع المرجع اللامحلي المطلوب.

أرسل إليَّ فوتونًا: الانتقال الفوري الكمي

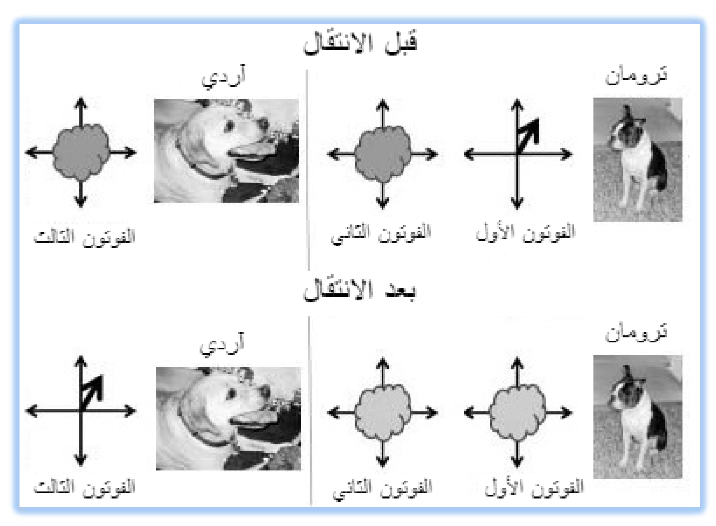
طوَّر فريق من الفيزيائيين العاملين في شركة آي بي أم (بضمنهم واضع مبرهنة منه النسخ ويليام ووترز) الانتقال الفوري الكمي في العام 1993. تُنقل الحالات غير المعلومة من مكان لآخر بعملية من أربع خطوات هي التالي:

- شارك زوجين من الجسيمات المتشابكة مع شريكك.
- قم بـ«قياس تشابكي» بين إحدى الجسيمات المتشابكة وبين الجسيم الذي تريد نقل حالته.
- أرسل نتيجة القياس إلى شريكك بوسيلة كلاسيكية.
- علم شريكك كيفية تعديل حالة الجسيم الذي لديه وفقًا لنتيجة القياس.

توظف وصفة الانتقال الفوري هذه التشابك الكمي لصنع نسخة من حالة عشوائية عن بعد، باستخدام قياس واحد ومكالمة هاتفية، عبر توظيف طبيعة القياس الكمي المؤثرة لمحاذاة أحد الفوتونين المتشابكين مع الفوتون الذي نريد نقل حالته، وفور عمل ذلك سيصبح الفوتون المتشابك الآخر باستقطاب يعتمد على الحالة الأصلية. ما زالت مبرهنة منع النسخ فعالة هنا، إذ ستتغير حالة الفوتون الأصلي بفعل القياس، لكن سيكون الفوتون المتشابك الآخر بذات الحالة الأصلية لهذا الفوتون في نهاية العملية.

إليك الطريقة: لنتخيل امتلاك ترومان فوتونًا واحدًا بحالة استقطاب معينة، وهو يرغب في إرسال هذه الحالة إلى صديقه القديم آردي (لكنه لا يستطيع إرسالها مباشرة). لحسن الحظ فإن ترومان وآردي كلبان كيسان توقعا حدوث هذا الأمر، لذا تشاركا سابقًا زوجين من الفوتونات المتشابكة، كل منهما لديه فوتون واحد. علمًا أن قطبية هذين الفوتونين

غير محددة حتى تقاس، لكنها معكوسة بالتأكيد (الفوتونان بحالتي استقطاب متعاكستين). لذا، نجد أن الكلبين يمتلكان ثلاثة فوتونات: الفوتون الأول هو ذو حالة الاستقطاب التي يريد ترومان إرسالها إلى آردي (واستقطابه بزاوية عشوائية، تصفه الدالة الموجية: $a|V> + b|H>$)، والفوتون الثاني هو فوتون ترومان من الزوجين المتشابكين، والفوتون الثالث هو فوتون آردي من الزوجين المتشابكين. تتيح وصفة الانتقال الفوري التي شرحناها سابقًا لآردي تحويل حالة فوتونه (الفوتون الثالث) إلى حالة مطابقة للفوتون الأول.



نسخة صورية من الانتقال الفوري الكمي. في بداية العملية، يمتلك ترومان فوتونين: الفوتون الأول في حالة محددة (لكن غير معلومة) يريد إرسالها إلى آردي، والفوتون الثاني في حالة غير محددة (لكنها متشابكة مع حالة الفوتون الثالث). في نهاية العملية وإنجاز الانتقال الفوري، سيمتلك ترومان فوتونين كلاهما في حالة غير محددة (ومتشابكين مع بعضهما)، في حين يمتلك آردي فوتونًا باستقطاب مطابق للاستقطاب الأصلي للفوتون الأول.

يعود الفضل في إمكانية عمل الانتقال الفوري إلى كون الفيزياء الكمية غير محلية. لقد رأينا في الفصل السابع أن أي قياس يجريه ترومان للفوتون الثاني سيحدد استقطاب الفوتون الثالث لآردي على الفور. لكن النقل الفوري ليس ببساطة قياس الاستقطاب المنفرد للفوتون الأول والثاني، فقد رأينا أن هذا لا يكفي. عوضًا عن ذلك فإن ما يفعله ترومان هو إجراء قياس مشترك للفوتونين معًا. فيقيس ما إن كان الاستقطابان متطابقين أو لا (لا يقيس نوعهما بل مجرد تطابقهما من اختلافهما).

إن قاس ترومان الفوتونين على نحو منفرد، لمعرفة ما إذا كانا مستقطبين أفقيًا أو عموديًا، تكون هناك أربع نتاجات محتملة: إما كلا الفوتونين باستقطاب عمودي (نرمز لهذا V_1V_2) وإما كلاهما باستقطاب أفقي (نرمز لهذا H_1H_2)، وإما أن الفوتون الأول باستقطاب عمودي والآخر باستقطاب أفقي (V_1H_2) وإما أن الأول باستقطاب أفقي والآخر باستقطاب عمودي (H_1V_2). تختلف احتماليات إيجاد هذه النتاجات اعتمادًا على الاستقطاب الذي كانت فيه الحالة الأصلية.

لكن ترومان لا يقيس القطبيات المفردة في الانتقال الفوري، بل يقيس ما إن كانت متطابقة وحسب. وهذا أيضًا ينتج أربع نتاجات محتملة، حالتين باستقطاب متطابق، وحالتين باستقطاب متعاكس. تسمى هذه الحالات المحتملة بـ«حالات بل»، وهي الحالات المسموح بها لزوجين من الفوتونات المتشابكة، وسيجد ترومان -حين يجري قياسه- الفوتون الأول والثاني في إحدى هذه الحالات الأربع.

الاستقطاب	الدالة الموجية	رقم الحالة
متطابق	$\|V_1V_2> + \|H_1H_2>$	1
متطابق	$\|V_1V_2> - \|H_1H_2>$	2
مخالف	$\|V_1H_2> + \|H_1V_2>$	3
مخالف	$\|V_1H_2> - \|H_1V_2>$	4

هذه الحالات هي تراكب للنتاجات الأربع المحتملة من القياسات المفردة، كما قطة شرودنغر المشهورة في حالة تراكب بين حية وميتة[2]. ما زال كل من الاستقطابين غير محدد، فيحتمل عند قياس الاستقطاب المفرد للفوتون الأول إيجاده عموديًا أو أفقيًا بالتساوي. وحين تقيس حالة الفوتون الأول، ستحدد حالة الفوتون الثاني لتكون إما مطابقة له وإما معاكسة، الأمر يعتمد على الحالة التي هما فيها.

• • •

- مهلًا لحظة، لماذا هناك أربع نتاجات محتملة؟ ألا يفترض أن تكون هناك نتيجتين؟ وما إشارات الزائد والناقص تلك؟ يجب أن تكون النتيجة أحد الخيارين: متطابقين أو متعاكسين!

- هذا صحيح في العالم الكلاسيكي، لكن في ميكانيك الكم هناك حالتان مختلفتان يكون فيها الاستقطاب متوافقًا (الحالة الأولى والثانية)، وحالتين يكون فيها الاستقطاب متعاكسًا (الحالة الثالثة والرابعة)، وهذا ينتج أربع حالات محتملة.

- لكن... ما الفرق بين الحالة الأولى والثانية؟

- إنهما حالتان مختلفتان، بنفس الطريقة التي تكون فيها حالة

$|H\rangle + |V\rangle$ وحالة $|H\rangle - |V\rangle$ حالتين مختلفتين لنفس الفوتون.

- أهما حالتين مختلفتين؟

- نعم. يمكنك تخيل ذلك بالتفكير في كيف أنهما يضافان لإنتاج استقطاب واحد في زاوية مختلفة. يمكنك تخيل $|H\rangle$ بأنها خطوة واحدة إما يسارًا وإما يمينًا، وتخيل $|V\rangle$ بأنها خطوة واحدة صعودًا أو نزولًا. هكذا نجد أن $|H\rangle + |V\rangle$ خطوة واحدة للأعلى وخطوة واحدة

---

[2] للدقة: يمكن أن تكون قطة شرودنغر قبل رصدها في إحدى الحالتين: «حية- ميتة» أو «حية+ ميتة».

لليمين، في حين أن |H> – |V> خطوة واحدة للأعلى وخطوة واحدة لليسار.

- هذا يعني أن |H> + |V> هي زاوية 45° إلى يمين المحور العمودي، و|H> – |V> هي زاوية 45° إلى يسار المحور العمودي؟

- تمامًا. ولكليهما احتمالية قدرها 50% لأن يرصدا باستقطاب أفقي أو عمودي، لكنهما حالتان مختلفتان. ولو دوَّرتي فلتر الاستقطاب (المُستقطِب) بزاوية 45° مع عقارب الساعة، سوف تمر عبره جميع فوتونات الدالة الموجية |H> + |V>، وستحجب جميع فوتونات الدالة الموجية |H> – |V>.

- هذا يعني أن الحالة الأولى هي إلى الأعلى يمينًا، والحالة الثانية هي إلى الأعلى يسارًا؟

- الأمر أعقد من ذلك. هناك جسيمان، لذا يجب تمثيل الأمر في أربعة أبعاد أو ما شابه، لكنك وضحت الفكرة الأساسية.

- حسنًا، أعتقد أني اقتنعت. مهلًا لحظة، لقد قلت إن الفوتونين المتشابكين الأصليين يجب أن يكونا باستقطاب متعاكس! ألا يعني ذلك أنهما إما في الحالة الثالثة وإما الرابعة؟

- أنت محقة تمامًا. يجب أن يكون الفوتون الثاني والثالث في الحالة الثالثة أو الرابعة في عمليات الانتقال الفورية المعتادة. لم أذكر ذلك لأني اعتقدت أنه سيعقد الأمور ولا داعي لذكره. أحسنت الرصد.

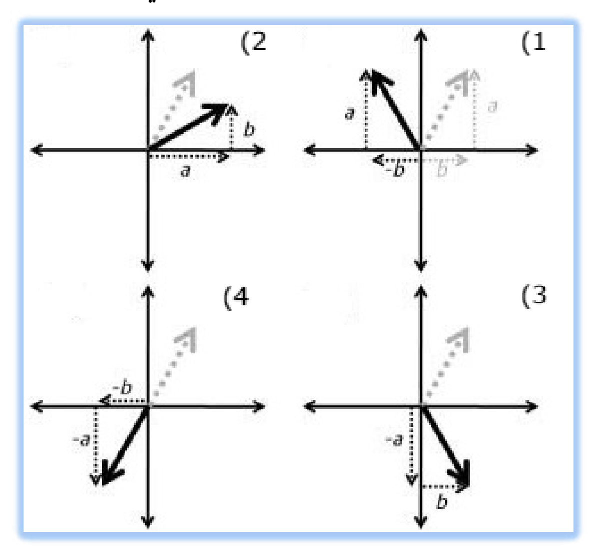
- أنا كلبة عبقرية. لا يمكنك استغفالي.

• • •

حين يجري ترومان قياسه الذي يتحرى فيه ما إن كان للفوتون الأول والثاني ذات الاستقطاب، فإنهما سيصبحان في إحدى حالات بل الأربع المحتملة. وفي تلك اللحظة تمامًا، سيجعل التشابك بين الفوتون الثاني والثالث الفوتون الثالث لآردي في حالة استقطاب محددة تعتمد على

حالة بل التي اكتشفها ترومان. هناك أربع نتاجات محتملة لاستقطاب الفوتون الثالث لآردي، الذي باتت متجهاته الأفقية والعمودية تعتمد على المتجهات الأفقية والعمودية الأصلية للفوتون الأول لترومان.

كل نتيجة من الأربع نتاجات المحتملة هي مجرد تدوير لحالة الاستقطاب الأصلية، بمعنى أن الأسهم تشير إلى اتجاه مختلف لكنها ما زالت تتضمن عدد خطوات قدره a في أحد الاتجاهات وعدد خطوات قدره b في اتجاه آخر. وبتسلمه نتاجات قياس ترومان، سيستطيع آردي استعادة الحالة الأصلية لفوتون ترومان، رغم أنه لا يعلم ما كانت تلك الحالة. بالنتيجة، كل ما على ترومان هو الاتصال بآردي وإخباره بنتيجة القياس. سيعلم آردي حينها ما عليه فعله لجعل الفوتون الثالث في الحالة الصحيحة.



حالة الفوتون الثالث لآردي بعد الانتقال الفوري لكل من النتاجات الأربع المحتملة من قياس ترومان التشابكي. تمثل كل حالة تدويرًا للاستقطاب الأصلي للفوتون الأول (الأسهم المنقطة).

يستطيع آردي تدوير استقطاب الفوتون الثالث ومعرفة الحالة الدقيقة التي ابتدأ بها ترومان استنادًا إلى نتاجات قياس ترومان.

ينقل هذا المخطط استقطاب الفوتون الأول إلى الفوتون الثالث محولًا إياه إلى نسخة طبق الأصل من الحالة الاصلية للفوتون الأول. لكن في خضم العملية، يغير القياس التشابكي المجرى للفوتون الأول والثاني حالة الفوتون الأول فلا يعود بذات الحالة الأصلية بل في حالة غير محددة متشابكة مع الفوتون الثاني. لذا يستحيل أن ينتهي الكلبان بحالتين متطابقتين تمامًا، وهذا يوافق مبرهنة منع النسخ.

نرى أيضًا أن النقل الفوري ليس فوريًا. نعم يحدد استقطاب الفوتون الثالث فور أن يقيس ترومان حالة الفوتون الأول والثاني، لكن هناك خطوة إضافية، لأن الفوتون الثالث ليس في الحالة الصحيحة بعد، بل في إحدى أربع حالات محتملة اعتمادًا على نتيجة قياس ترومان. ولا ينتهي الانتقال الفوري حتى يجري آردي التدوير النهائي للفوتون الثالث. وهذا ما لا يمكنه فعله قبل تسلمه رسالة تنبؤه بنتيجة قياس ترومان، ويجب على تلك الرسالة السفر من كلب إلى آخر بسرعة لا تزيد عن سرعة الضوء.

الانتقال الفوري عبر الدانوب: الإثبات التجريبي

اقترحت فكرة الانتقال الفوري لأول مرة عام 1993، وأثبتها فريق من جامعة إنسبروك يقوده أنطون تسايلينغر[3] في العام 1997.

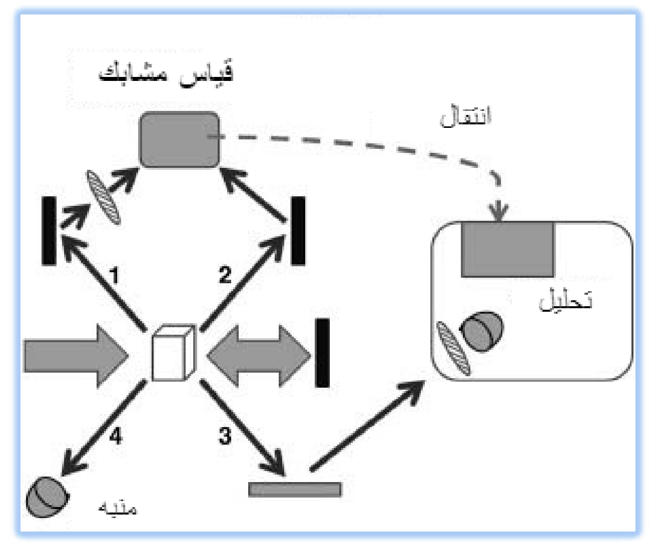
أنتج فريق تسايلينغر فوتوناته المتشابكة بإرسال فوتون من ليزر يطلق أشعة فوق البنفسجية عبر بلورة خاصة تنتج فوتونين تحت الحمراء، كل منهما بنصف طاقة الفوتون الداخل. ثم تصدم أشعة الليزر مرآة تعكسه إلى البلورة مرة ثانية، فتنتج فوتونين إضافيين ليكون النتاج أربعة فوتونات.

يُستخدم زوجين من هذه الفوتونات بوظيفة فوتونين متشابكين للانتقال الفوري (الفوتون الثاني والثالث)، ويرسل زوج من الفوتونين الآخرين عبر مستقطب ليكون الحالة المراد نقلها فوريًا (الفوتون الأول). ويمثل الفوتون الأخير (الرابع) منبهًا يعلم المختبرين بموعد تجميع البيانات.

مُرر الفوتون الثاني والثالث من مفرق شعاع حتى يحدث قياس تشابكي. لا يمكن للعلماء قياس غير حالة واحدة من حالات بل الأربع، لكنهم علموا بقياسها (معرفة أي حالة هي) أن الفوتون الثالث أصبح باستقطاب معين. وكلما قاسوا الفوتونين الأول والثاني في الحالة الرابعة (احتمالية حدوثها 25%) أرسلوا إشارة إلى محللهم ليقيس حالة الفوتون الثالث. ولأنهم ضبطوا استقطاب الفوتون الأول بنفسهم فقد استطاعوا تكرار التجربة مرات عديدة، وأكدوا أن الفوتون الثالث اُستُقطِبَ بذات الزاوية التي تنبأت بها عملية الانتقال الفوري.

---

[3] ذكرنا أنطون تسايلينغر مرتين قبل هذه، الأولى في الفصل الأول إذ كان رئيس المجموعة التي أثبتت حيود الجزيئات، والثانية في الفصل الخامس حين أجرى تجربة الاستجواب الكمي. لقد حقق مسيرة مهنية مميزة وعظيمة في التجارب التي تثبت السمات الغريبة والرائعة لميكانيك الكم.



مخطط لتجربة فريق تسايلينغر: تمر أشعة ليزر فوق البنفسجي عبر بلورة محولة تنتج فوتونين بأطوال تحت الحمراء (الفوتون الثاني والثالث)، واللذان يمثلان الزوجين المتشابكين في الانتقال الفوري. تصدم أشعة الليزر بعد ذلك مرآة تعيده عبر البلورة التي تفرقه مجددًا لينتج زوجين آخرين (الفوتون الأول والرابع)، يمثل أحدهما الفوتون المراد نقله، والآخر مجرد منبه يعلم الفريق أن جميع الفوتونات قد أنتجت. يُجمع الفوتون الأول والثاني للقياس التشابكي، وحين يكونان في حالة بل الملائمة، يقاس استقطاب الفوتون الثالث ليؤكد نجاح «الانتقال الفوري».

لم يوظف الإثبات الأولي لعملية الانتقال الفوري غير حالة واحدة من حالات بل الأربع المحتملة، لأسباب تتعلق بسهولة العمل، ونقلت فيه حالة الاستقطاب مسافة نصف متر. لكن وسعت التجارب اللاحقة القياسات لتشمل جميع النتاجات الأربع المحتملة وأطالوا المسافة إلى حد بعيد.

نجح فريق تسايلينغر في العام 2004 بإنجاز عملية انتقال فوري للفوتونات من إحدى ضفاف نهر الدانوب[4] إلى الضفة الأخرى باستخدام ألياف بصرية لمسافة قدرها 600 متر تقريبًا، مثبتين أن الانتقال الفوري عملي في المسافات الأطول[5].

• • •

- حسنًا، ولأي شيء ذلك؟

- ماذا تقصدين؟

- أعني، من يأبه بإمكانية نقل حالة فوتون؟

- ليست الفوتونات هي الوحيدة التي يمكن نقل حالتها. الرياضيات هي نفسها لأي نظام له حالتين، لذا يمكنك نقل حالة دوران إلكترون مفرد مثلًا، أو نقل تراكب معين من مستويي طاقة من ذرة إلى أخرى.

- نعم، لكن ما دمت تبادل الذرات المتشابكة أو الإلكترونات، لم لا ترسلها مباشرة عوضًا عن نقلها فوريًا؟

- يصعب إرسال حالات الذرات والإلكترونات لمسافات طويلة دون أن تتغير، فهي هشة نوعًا ما. لكنك تستطيعين أخذ ذرة مثلًا ومشابكتها مع فوتون من فوتونين متشابكين، ثم استخدام الفوتون الآخر لنقل حالة الذرة الأولى إلى ذرة أخرى في مكان أبعد.

- هذا أفضل، لكنها ما زالت مجرد ذرة واحدة.

- ليس بالضرورة. لقد استخدم فريق من معهد نيلز بور في كوبنهاغن

---

[4] انتقل الأستاذ تسايلينغر من جامعة إنسبروك إلى جامعة فيينا في السبع سنوات بين التجربتين.

[5] لا توجد مشكلة حقيقية في إرسال الفوتونات لمسافات طويلة -فالضوء يصلنا من أبعد المجرات- لكن سيدمر التفاعل مع المحيط حالات التشابك عبر عملية فك الترابط التي ناقشناها في الفصل الرابع. تظهر تجربة فيينا إمكانية تلافي فك الترابط بما يكفي لإرسال الفوتونات المتشابكة لمسافات مفيدة.

الانتقال الفوري لنقل الحالة الجماعية لمجموعة ذرات إلى مجموعة أخرى في العام 2006. كان في كل مجموعة من تلك المجموعتين قرابة تريليون ذرة؛ ورغم أنه عدد صغير جدًا مقارنة بالناس والكلاب، فإنه إثبات لإمكانية نجاح عملية الانتقال الفوري في الأنظمة الأكبر.

- ما زال الأمر عديم الفائدة بالنسبة لي، لكني أعتقد أنه يتحسن.

- شكرًا لك. غمرتني بلطفك.

ما الفائدة؟ تطبيقات الانتقال الفوري

يتيح لنا الانتقال الفوري الكمي توظيف التشابك لنقل حالة كمية معينة من مكان إلى آخر بأمان، من دون نقل الجسم الأصلي. يمكن استخدامه لإعادة إنتاج حالات فوتونية عن بعد، أو لنقل حالة تراكب من ذرة أو مجموعة ذرات إلى أخرى. لكن تظل العملية الواقعية أقل سحرًا مما صوره الخيال العلمي الجامح.

يشبه الانتقال الفوري الكمي جهاز الفاكس التقليدي من ناحية النقل، فلا ينقل غير المعلومات في الحالتين. وكما يجب وجود ورق وحبر في الفاكس الآخر الذي يُرسل إليه المستند، يجب وجود مواد أولية في المكان الذي ننقل إليه الحالات؛ على سبيل المثال، إن أردنا نقل حالة ذرة، يجب وجود ذرة أخرى ملائمة في المكان المنقول إليه.

لكن إن كنا نهدف إلى نقل الجسم نفسه من مكان إلى آخر، فلا سبب يدعونا للتفكير في النقل الفوري الكمي! لأن هذه الطريقة تنقل الحالة نفسها، ولعلك لا تحتاج إلى نقل الحالة نفسها في عمليات إرسال جسم جامد مثل مقرمشات الكلاب. إذ لا يؤثر اختلاف حالات الذرات في طعم المقرمشات ولا ملمسها، المهم هو نقل مواضع الجزيئات والذرات نسبة لبعضها. لذا لن يلزمك لإرسال المقرمشات غير جهاز فاكس مطور يعمل على المستوى الجزيئي، لا يعتمد جوهر هذا الموضوع على الفيزياء الكمية.

إذًا، لماذا نهتم بالانتقال الفوري الكمي؟

لعل الانتقال الفوري الكمي غير ضروري لنقل الأجسام الجامدة، لكنه قد يكون ضروريًا لنقل الكائنات الواعية. يؤمن بعض العلماء أن الوعي في جوهره ظاهرة كمية (وهذا ما يدعو إليه روجر بنروز في كتابه العقل الجديد للإمبراطور). إن صح هذا الكلام، سيستوجب نقل الناس أو الكلاب آلة نقل فوري كمية تعيد إنتاج حالات دماغهم الأصلية، لا مجرد جهاز فاكس مطور. ربما يكون الانتقال الفوري المفتاح الذي يضمن أن

تصل إلى وجهتك بكامل وعيك، وإيمانك أن الأرض كروية...

هذا الكلام سابق لأوانه في كل الأحوال، لأن الجهود البشرية ما زالت تجاهد لنقل الأجسام الأصغر بكثير. تتمثل أهم فوائد الانتقال الفوري الكمي في الحالات التي تكون فيها معلومات الحالة أهم ما ينقل. والاستخدام الأساسي لهذا النوع من الأشياء في الحوسبة الكمية.

الحاسوب الكمي -أسوة بالحاسوب التقليدي- في أساسه مجموعة ضخمة من الأشياء التي يمكنها أن تكون بإحدى حالتين هما «0» و«1»[6]. تُسلسل هذه الـ«بتات» مع بعضها لإنتاج أرقام. على سبيل المثال، يمكن تمثيل الرقم 229 بثمانية بتات في النمط: 11100101.

يتمثل أبرز فرق بين الحواسيب التقليدية والكمية في البتات، إذ تسمى في الحواسيب الكمية «كيوبتات»[7]، وهي لا تكون بحالة 0 و1 وحسب، بل يمكن أن تكون بحالة تراكب من 0 و1 في ذات الوقت. يمكنها كذلك أن تكون بحالة تشابك، تعتمد فيها حالة أحد الكيوبتات على حالة كيوبت آخر في مكان آخر.

تتيح هذه الحالات الإضافية للحاسوب الكمي حل نوع من المشاكل تتأخر في حلها الحواسيب التقليدية (مثل إجراء عملية تعميل[8] لأرقام كبيرة). تعتمد عمليات التشفير الحديثة المستخدمة لتشفير الرسائل -سواء الأسرار الحكومية أو عمليات التحويل المالي عبر الإنترنت- على كون عملية التعميل بطيئة. وكون الحاسوب الكمي أقدر على هذه العمليات

---

[6] توظف الحواسيب التقليدية ملايين الترانزستورات الموضوعة على رقاقات سيليكون، في حين يمكن أن تستخدم الحواسيب الكمية أي شيء له حالتين في الأقل، مثل الجزيئات والذرات والإلكترونات.

[7] يسمى كيو-بت qu-bit نسبة للكم (quantum). ليس الفيزيائيون بذاك الإبداع في اختيار التسميات...

[8] التعميل هو فك دالة كثيرة الحدود -أو مصفوفة أو أرقام- إلى حاصل ضرب دالتين أو أكثر، ويسمى أيضًا التفكيك factorization.

فإنه قد يستطيع فك تلك الشفرات بسرعة، وهذا يجعله موضع اهتمام للحكومات والمصارف[9].

الحالة الكمية لكل كيوبت شديدة الأهمية لعمل الحاسوب الكمي، وربما هذا هو المكان المناسب لعمليات الانتقال الفوري الكمي. لأن الحسابات التي تتطلب عددًا كبيرًا من الكيوبتات قد تستلزم تشابك كيوبتين مفصولين بمسافات كبيرة -نسبيًا- في الحاسوب. وربما يكون الانتقال الفوري مفيدًا لإجراء العمليات اللازمة.

علاوة على ذلك، إن أردنا في المستقبل توصيل حاسوبين كميين (أو أكثر) في أماكن مختلفة، لتكوين ما يسميه جيف كيمبل من كالتيك بالإنترنت الكمي، ربما يكون التشابك والانتقال الفوري مفتاحي ذلك. سيطور ذلك الحوسبة أشد تطوير، كما يطور الإنترنت الكلاسيكي حواسيبنا التقليدية.

الانتقال الفوري الكمي موضوع رائع بغض النظر عن تطبيقاته المستقبلية. إنه يثبت إمكانية استغلال التأثيرات اللامحلية للتشابك الكمي و«التأثير الشبحي عن بعد» المذكور في ورقة إي بي آر واقعيًا، بنقل المعلومات بطريقة لا يمكن عملها بالوسائل التقليدية. لربما لن يساعد الكلاب في صيد السناجب (ليس حاليًا في الأقل)، لكنه نافذة أخرى نرى عبرها الطبيعة الكمية الغريبة والعميقة للكون.

• • •

- لا أعلم. ما زلت أعتقد بتفاهته.

- لماذا؟

- لأنك بتسميته «انتقال فوري» جعلتني أنتظر منه أكثر من مجرد نقل معلومة عن الحالة.

---

[9] وكالة الأمن القومي هي من أكبر ممولي أبحاث الحوسبة الكمية في الولايات المتحدة.

- هذا مخيب للآمال، أعلم. وأنا لست الذي أطلق عليه هذه التسمية لعلمك.

- على أي حال، هل انتهى التشابك؟ مجرد تجربة أسبيه والانتقال الفوري؟

- لا، بتاتًا. يمكنك توظيف التشابك في أشياء كثيرة. فهو المفتاح للحوسبة الكمية كما قلت، ويمكن استخدامه في «التشفير المكثف»، وهو إرسال «بتين» من المعلومات في كل بت منقول.

- ما زلنا لم نخرج من دائرة التلاعب بالمعلومات.

- هناك التشفير الكمي كذلك، وهو استخدام التشابك لنقل سلسلة أرقام عشوائية من شخص إلى آخر، أرقام يمكن استخدامها لتشفير الرسائل أحسن تشفير. ولن يمكن لأحد أن يسترق النظر إلى ما في تلك الرسائل، لأن هذا سيغير حالة الجسيم ويلخبط الشفرة بطريقة يمكن ملاحظتها.

- ما زال الموضوع يدور حول المعلومات.

- حسنًا، نعم، لكن هناك من يعتقدون أن أفضل طريقة للتعاطي مع ميكانيك الكم هي بالمعلومات. بل يمكن القول إن كامل علم الفيزياء يدور حول المعلومات بطريقة ما.

- حقًا؟ حسنًا أنا كلبة، وكل اهتمامي يدور حول صيد السناجب.

- وهذا موضوع متعلق بالمعلومات كذلك.

- كيف ذلك؟

- لأن لمعلوماتك، بين ذلك العشب سنجابٌ كبير سمين.

- سناجب سمينة! رائع!

الفصل التاسع

أرانب من الجبن:

الجسيمات الافتراضية والكهروديناميكا الكمية

كانت إيمي تهز ذيلها بحماس وهي تنظر عبر النافذة المطلة على الحديقة. نظرت إلى الحديقة وإذ بها خالية! سألتها: إلامَ تنظرين؟ فردت: إلى الأرانب المصنوعة من الجبن! عاودت النظر فما وجدت أرانبَ.

- لا توجد أرانبُ في الحديقة. وقطعًا لا توجد أرانب مصنوعة من الجبن.

- لكن الجسيمات تخلق من الفضاء الفارغ على الدوام، أليس كذلك؟

- أما زلت تقرأين كتب الفيزياء الكمية خاصتي؟

- أشعر بالملل حين تغيب. على أي حال، أجب عن سؤالي.

- نوعًا ما، نعم. تسمى تلك الجسيمات بالجسيمات الافتراضية؛ يمكن لنقطة الطاقة الصفرية للفراغ -في الظروف المناسبة- أن تخلق أزواج جسيمات بين حين وآخر، أحد الزوجين مادة اعتيادية والآخر مادة مضادة.

- هل فهمت الآن؟ أرانب مصنوعة من الجبن! [باتت تهز ذيلها أسرع]

- لا، لم أفهم. في كل الأحوال، على تلك الجسيمات الافتراضية أن تفني بعضها في مدة قصيرة جدًا خضوعًا لمبدأ الريبة في الطاقة والزمن. مثلًا، يعيش زوجا الإلكترون-بوزيترون الافتراضيان قرابة 10^{-21} ثانية قبل أن يختفيان. لا يعد هذا النوع من الجسيمات حقيقيًا لأنه لا يعيش بما يكفي.

داخلتني باهتمام: لكن بالإمكان أن تصبح جسيمات حقيقية، أليس كذلك؟ طبقًا لإشعاع هوكينغ؟

- نوعًا ما نعم. يمكن أن يُخلق جسيمان افتراضيان قرب ثقب أسود، فيمتص الثقب أحدهما وينجو الآخر ليصبح جسيمًا حقيقيًا، هذه هي الفكرة الأساسية.

ارتفع ذيلها مجددًا وهي تردد: أرانب من الجبن!

- ماذا تقصدين بهذا؟

- أليست الجسيمات الافتراضية تخلق على الدوام؟ حتى في حديقتنا؟

- نعم هذا صحيح.

- وهي تشمل الأرانب، صحيح؟

- عمليًا، يجب أن يخلق زوج أرنب وزوج أرنب مضاد...

- ويمكن لهذه الأرانب أن تكون من الجبن؟

- لا أرجح ذلك، لكنه ليس مستبعدًا في كونٍ مثل كون «كل محتمل واقع لا محالة» لماكس تيغمارك[1] لذا نعم، قد يخلق في حديقتنا زوجان من أرنب وأرنب مضاد مصنوعان من الجبن والجبن المضاد، لكن...

- وإن أكلت أحدهما، سيصبح الآخر حقيقيًا!

- نعم، لكنهما سيفنيان بعضهما قبل أن تتمكني من ذلك.

- أنا سريعة جدًا.

- أسريعة لدرجة مواكبة أرنبين لن يوجدا إلا لـ10^{-52} ثانية؟

- إذًا يجدر بك أن تتركني في الخارج، لأستطيع صيد أرانب الجبن تلك.

---

[1] ماكس تيغمارك هو عالم كونيات في معهد ماساتشوستس للتقنية، عرف بتقديمه فرضية أن كوننا هو واحد من عدد كبير من الأكوان المتوازية. وفقًا لتيغمارك، تتضمن تلك الأكوان المتعددة كل نوع ممكن من الأكوان التي يمكن وصفها رياضيًا، حتى تلك غير المنطقية بالنسبة لنا. يشبه عمل تيغمارك بطريقة ما فكرة «الواقعية الشكلية» للفيلسوف ديفيد كيلوج لويس.

- لِمَ لَم تقولي إنكِ تريدين الخروج وحسب؟

- لن يكون ممتعًا. على أي حال، تحيا أرانب الجبن!

- ما زلت لا أرى أرانبَ في الحديقة، لكن يوجد سنجاب قرب مغذية الطيور.

- سنجاب! مرحى!

فتحت لها الباب فلم تضع وقتًا بل ركضت وراء طريدتها، التي هربت إلى أعلى الشجرة في الوقت المناسب.

• • •

رأينا في الفصل الثاني كيف ظهرت نقطة الطاقة الصفرية بسبب الطبيعة الموجية للمادة. تعني تلك النقطة استحالة أن يكون الجسيم الكمي في حالة سكون تام، بل يمتلك طاقة دنيا في الأقل. ينطبق هذا المبدأ حتى على الفضاء الفارغ. في الفيزياء الكمية، الفراغ التام هو عاصفة نشاط دائمة، قوامها الجسيمات الافتراضية التي تظهر إلى الوجود للحظة بفضل طاقة النقطة الصفرية، ثم تختفي.

فكرة ظهور «جسيمات افتراضية» إلى الوجود في وسط الفضاء الفارغ هي من أعجب أفكار الفيزياء الحديثة وأمتنها. سنتحدث في هذا الفصل عن نظرية الديناميكا الكهربائية الكمية أو الكهروديناميكا الكمية (QED) وهي أساس فكرة الجسيمات الافتراضية. سنستعرض أيضًا التجارب التي ربما جعلت هذه النظرية أوثق نظرية علمية اختبارًا في تاريخ العلم!

المفارقة أن استعراضنا لهذه النظرية عالية الدقة يجب أن يمهد بالحديث عن مبدأ اللادقة لهايزنبيرغ.

يستغرق العد وقتًا: مبدأ الريبة في الطاقة والزمن

أشهر نسخة من مبدأ الريبة هي المستعرضة في الفصل الثاني، والتي تحدد مبلغ الدقة الممكن عند قياس موضع جسيم وزخمه. إنها تنص جوهريًا: كلما زاد علمنا بموضع الجسيم، قل علمنا بسرعة حركته، والعكس صحيح.

لكن هناك مبدأ ريبة أقل شهرة من الأول، يتمحور حول الطاقة والزمن، ونصه إن حاصل ضرب الريبة في الطاقة بالريبة في الزمن يساوي أو يزيد عن ثابت بلانك مقسومًا على أربعة أضعاف النسبة الثابتة:

$$\Delta E . \Delta t \geq h/4\pi$$

وكما في مبدأ ريبة الموقع-الزخم، يعني هذا المبدأ أننا كلما علمنا أكثر عن إحدى هاتين القيمتين، زاد جهلنا بالقيمة الأخرى.

قد تبدو فكرة ارتباط الطاقة بالزمن غريبة أول الأمر، لكننا نستطيع فهمها بالتفكير في الضوء. كما رأينا في الفصل الأول (الصفحة 30)، يحدد ترددُ الضوء طاقةَ فوتوناته. لذا، سيتطلب الحصول على ريبة ضئيلة في قياس الطاقة قياس التردد بدقة.

كيف نقيس التردد بدقة؟

تخيل أنك تريد قياس المعدل الذي تهز به كلبة متحمسة ذيلها، وهو اهتزاز منتظم تقريبًا، لكن فيه تقلبات يسيرة في التردد والسعة لأن الكلبة ستهز ذيلها أسرع مرةً وأبطأ مرة أخرى، وتميله إلى اليمين أكثر مما تميله لليسار تارة، وبالعكس تارة أخرى. فما أفضل طريقة لقياس معدل تردد هذا الاهتزاز؟

يقاس التردد بعدد الاهتزازات في الثانية، لذا يجب حساب عدد مرات اهتزاز الذيل في مدة زمنية معينة. على سبيل المثال، إن عددت عشرة اهتزازات في مدة زمنية قدرها خمس ثوانٍ، يكون التردد اهتزازين في الثانية.

مع ذلك، هناك شيء بالغ الأهمية يجب ذكره، هو إن هناك بعض الريبة (اللادقة) في أي نوع من هذه القياسات، لأنك حين عددت عشرة اهتزازات، أكانت الاهتزازات عشرة بالتمام والكمال أم عشرة وقليل؟ أتحرك ذيلها إلى اليمين تمامًا أم أنها هزته أبعد أو أقل في إحدى المرات؟

إن أردت تقليل هذه الريبة فعليك حساب عدد الاهتزازات في مدة أطول. تميل الريبة في حسابك إلى أن تكون ثابتة (قدرها عُشرَ هزة مثلًا)، لذا كلما زاد عدد الاهتزازات التي تحسبها قلت الريبة في حسابك.

إن عددت عشرة اهتزازات في خمس ثوان، مع الأخذ بالحسبان الريبة (0.1 هزة)، سيكون التردد:

التردد= (10± 0.1 هزة)/ 5 ثوان= 2.00± 0.02 هرتز[2]

هذا يعني أن قيمة التردد الحقيقية بين 1.98 و2.02 اهتزاز في الثانية.

وإن حسبت اهتزاز ذيل الكلبة في خمسين ثانية (بافتراض أنها لا تصاب بتشنج) فإنك ستعد مئة هزة، فيكون التردد مع الأخذ بالحسبان الريبة الثابتة:

التردد= (100± 0.1 هزة)/ 50 ثانية= 2.000± 0.002 هرتز.

هذا يعني أن قيمة التردد الحقيقية بين 1.998 و2.002 اهتزاز في الثانية.

بالنتيجة، نجد أن زيادة عدد الاهتزازات المحسوبة يقلل الريبة في التردد.

لكن كلفة تقليل الريبة في التردد هي زيادة الريبة في الزمن. إذ يجب جعل وقت القياس أطول بعشر مرات لتقليل الريبة في الزمن بمقدار عشر مرات، هذا يعني أنك لن تستطيع تحديد متى قست التردد بالضبط. ستعلم التردد المتوسط في تلك الخمسين ثانية، لكنك لن تستطيع الإشارة

[2] وحدة قياس التردد هي الهرتز، نسبة للعالم الألماني هاينريش هرتز. وهو أول من أثبت تجريبيًا كون الضوء موجة كهرومغناطيسية.

إلى لحظة بعينها وتقول إن التردد هنا يساوي 2.000 هرتز. كل ما يمكنك قوله إن ذيل الكلبة كان يهتز بمعدل 2.000 هرتز في الخمسين ثانية، لكنه ربما كان أسرع أو أبطأ في أي ثانية منها.

يمكنك أن تكون أدق في وقت القياس، مثلًا إن قست لنصف ثانية وحسب، وعددت اهتزازًا واحدًا. لكن الريبة في التردد ستزيد في هذه الحالة: التردد= 2.0± 0.2 هرتز. بالنتيجة: لا يمكن تحصيل ريبة ضئيلة في كل من تردد الاهتزاز والوقت المستغرق لحسابه. وينطبق ذات المبدأ على حساب تردد الضوء، رغم أنه أسرع من أن نستطيع حسابه باليد.

نلاحظ مبدأ الريبة هذا على نحوٍ مباشر في تفاعل الضوء والذرات. نحن نعلم من الفصل الثاني والثالث أن الذرات توجد في حالات طاقة مسموح بها وحسب، وأنها تتحرك بين تلك الحالات بامتصاص الفوتونات أو إشعاعها.

وحين تنتقل الذرة من حالة طاقة عليا إلى حالة أدنى، سيحدد فرق الطاقة بين المستويين تردد الفوتون المنبعث. لكن في فرق الطاقة بعض الريبة التي تتناسب وطول الوقت الذي أمضته الذرة في حالة الطاقة العليا. لذا، قد تشع ذرتان تنتقلان من ذات حالة الطاقة العليا فوتونين بترددين مختلفين قليلًا جدًا.

هذا الفرق شديد الضآلة قياسًا بالذرات الاعتيادية، إنه أقل من تردد الفوتونات بنحو مئة مليون مرة، لكننا نستطيع قياسه بالليزر رغم صغره. يجدر الذكر أن هذه الريبة الصغيرة في التردد تحد قدرتنا على إجراء قياسات معينة للخصائص الذرية.

- ما المهم في أنك تستغرق وقتًا في حساب الأشياء! بل ما علاقته بأرانب الجبن؟

- مشكلة حساب التردد هي مثال يسير لمبدأ أعم. مبدأ الريبة في الطاقة والزمن لا يهتم بأي صورة تكون فيها الطاقة.

- لماذا؟

- لأن جميع صور الطاقة متكافئة، بدليل أننا نستطيع تحويل صورة طاقة إلى أخرى. لذا، إن كان لديك فوتون بطاقة ذات ريبة، واستخدمته لتحريك إلكترون ما، ستكون في الطاقة الحركية لذلك الإلكترون بعض الريبة.

- ما زلت لا أرى علاقة هذا بالأرانب.

- سأوضح أكثر، نعلم من النظرية النسبية لآينشتاين أن الطاقة والمادة (الكتلة) متكافئتان...

- $E= MC^2$

- بالضبط. وبما أن الكتلة هي مجرد صورة من صور الطاقة، يمكننا تحويل الطاقة إلى كتلة والكتلة إلى طاقة. بالنتيجة، يكون للكتلة ريبة أسوة بسائر صور الطاقة، وهذه الريبة مرتبطة بطول مدة وجود الكتلة.

- هذا يعني أن كتلة الأرانب المصنوعة من الجبن ستكون ذات ريبة؟

- تمامًا. وستكون الريبة كبيرة جدًا إن كانت حياتها قصيرة، مثلًا، بالنسبة لشيء مثل الكوارك القمي الذي يعيش 10^{-25} ثانية، فإن الريبة الكمية بفعل عمره ستقارب 1% من كتلته الكلية.

- لكن ستكون الريبة في كتلة الأرنب صغيرة إن بقي وقتًا طويلًا؟ أريد أرنبًا مصنوعًا من الجبن بريبة كتلة صغيرة!

- بالتوفيق في ذلك؛ لن يعيش أرنب مصنوع من الجبن طويلًا بقربك.

- نعم، أصبت.

كيف يوصلنا ذلك إلى أرانب الجبن؟

لنطبق مبدأ الريبة السابق على الفضاء الفارغ: يمكننا التأكد من خلو مكان ما بالنظر إليه مدة طويلة؛ لكن لن يمكننا الجزم بفراغه إن نظرنا إليه مدة قصيرة. يحتمل أن يحتوي الفضاء على جسيمات، وفي ميكانيك الكم هذا يعني أنه قطعًا سيحتوي عليها.

ليست الريبة في خلو الفضاء بالغرابة التي تبدو بها لأول وهلة. على سبيل المثال، إن أعطى فيزيائي أو ساحر مسرحي صندوقًا لكلبة لتتفحصه على مهل، فإنها تستطيع تحديد أنه فارغ بيقين. إذ ستشم جميع أركانه وتتحقق من الفتحات الخفية وتتأكد من عدم احتوائه تجويفًا يخفي الأشياء. لكنها لن تستطيع التأكد من خلوه إن لم يسمح لها بغير لمحة أو شمة سريعة للصندوق. فربما احتوى على شيء خفي لم تستطع ملاحظته في المدة القصيرة.

يعتمد الوقت اللازم للتأكد من خلو الصندوق على حجم الصندوق وحجم ما تبحث عنه. فلا يلزمك وقت طويل لتحدد إن كان الصندوق يحتوي على قطة الأستاذ شرودنغر الشهيرة، لكنك تحتاج إلى وقت أطول لتستبعد احتمالية احتوائه على أجسام أصغر بكثير، مثل فتات مقرمشات الكلاب[3].

تنطبق ذات الفكرة على الفضاء الفارغ في الفيزياء الكمية، بفعل مبدأ الريبة في الطاقة والزمن. حين ننظر إلى صندوق فارغ مدة طويلة جدًا، يمكننا قياس محتواه من الطاقة بريبة صغيرة، ومعرفة أنه لا يحتوي على غير طاقة النقطة الصفرية (ليس فيه جسيمات). لكن إن نظرنا مدة قصيرة وحسب، فإن الريبة في الطاقة ستكون كبيرة. ما يعني أننا لا نستطيع تأكيد

---

[3] الأمر أصعب لنا نحن البشر، إذ تعجز أنوفنا عن شم الفتات الدقيق في الأركان، خلافًا للكلاب.

أن الصندوق لا يحتوي على جسيمات، لأن الجسيمات ذات كتلة، والكتلة تكافئ الطاقة حسب معادلة آينشتاين المشهورة ($E=MC^2$).

يسبب عدم علمنا بالحالة الدقيقة لما في الصندوق حالة تراكب من جميع الحالات الممكنة، كما في تجربة قطة شرودنغر. أي إن صندوقنا خالٍ من الجسيمات ومملوء بشتى أنواعها في ذات الوقت، كما قطة شرودنغر حية وميتة معًا.

بعبارة أخرى: يمكن أن يحتوي الصندوق على جسيمات، ما دامت تظهر وتختفي بسرعة عالية تمنعنا من رصدها مباشرةً.

لكن كيف يمكن أن تختفي الجسيمات بهذه السهولة؟ فالجسيمات الاعتيادية لا تختفي حين لا نراقبها، ما لم تكن صالحة للأكل وبقربها كلبة...

الجواب أن الجسيمات تستطيع الاختفاء من الصندوق ما دامت تظهر بهيئة زوجين، أحدهما من المادة والآخر من المادة المضادة. لكل جسيم في الكون مادة مضادة تكافئه في الكتلة وتضده في الشحنة، على سبيل المثال فإن الجسيم المضاد للإلكترون هو البوزيترون، والجسيم المضاد للبروتون هو البروتون المضاد. وحين يتفاعل جسيم من المادة الاعتيادية (مثل الإلكترون) مع جسيم من المادة المضادة (مثل البوزيترون) فإنهما سيفنَيان وتتحول كتلتهما إلى طاقة.

عمليًا، هذا يعني أن الجسيمات والجسيمات المضادة يمكنها الظهور من العدم في الصندوق.

هذا يرفع الطاقة في الصندوق بكمية صغيرة -مثلًا يرفع زوجا إلكترون-بوزيترون الطاقة بمقدار كتلة إلكترونين مضروبة بمربع سرعة الضوء- لكن لا توجد مشكلة ما داما يفنيان بعضهما في مدة قصيرة، لأن الريبة في

الطاقة كبيرة بما يكفي لتغطية الجسيمين الإضافيين[4].

كم من الوقت يجب أن ننظر في الصندوق لنستبعد احتمالية احتوائه على نوع معين من الجسيمات؟

يعتمد الوقت على كتلة الجسيم الذي نريد استبعاد وجوده، فنحتاج إلى جعل الريبة في الطاقة أقل من طاقة ذلك الجسيم التي تحددها معادلة آينشتاين $E=MC^2$.

لجعل الريبة في الطاقة صغيرة فنستبعد احتمالية احتواء الصندوق على زوجي إلكترون-بوزيترون مثلًا، فإننا نحتاج إلى النظر مدة 10^{-21} ثانية. أي مدة أقل من الثانية بمليار تريليون مرة، وهي أقل بقليل من الوقت الذي يستغرقه الضوء لقطع الذرة. ويمتلك زوجا بروتون-بروتون مضاد كتلة أكبر، لذا سيعيشان مدة أقصر، قد تقل عن 10^{-24} ثانية (وهي نفسها المدة اللازمة للنظر في الصندوق لنستبعد وجود هذا الزوج). أما لأرنب يزن كيلوغرامًا (سواء مصنوع من الجبن أو غيره) فلن نحتاج إلى النظر طويلًا لأنه سيدوم مدة قدرها 10^{-52} ثانية[5].

• • •

- أظن أنك تعقد الموضوع فوق ما يجب. ما مدى صعوبة قياس الجسيمات الصفرية؟

- أنتِ تقولين ذلك؟ الكلبة التي تشم كل أرضية المطبخ ليلًا أملًا بإيجاد جزيئة طعام ربما سقطت سهوًا؟

---

[4] كذلك يمكن التفكير في الأمر كالتالي: وجودُ الجسيمُ والجسيمُ المضاد مدةً قصيرة جدًا يجعل الريبة في كتلتيهما كبيرة. وإن كان الزمن قصيرًا جدًا، ستكون الريبة في الكتلة أكبر من الكتلة ذاتها، لذا لن نستطيع القول إن الكتلة لم تكن تساوي الصفر. في كلا الحالتين، يمكن للجسيمين الوجود مدةً قصيرة لأن جسيمين كتلتهما صفرًا لن يزيدا الطاقة في الصندوق شيئًا.

[5] هذه المدة قصيرة جدًا لدرجة أنها قد لا تكون منطقية، لأن بعض النظريات تقول إن الزمن مكمم، وكل كم منه يساوي 10^{-44} ثانية (زمن بلانك)، ويستحيل وجود فترات زمنية أقصر من زمن بلانك.

- لكنك تسقط الطعام أحيانًا، وطعامك ألذ من طعامي.

- جوابًا عن سؤالك، من الصعب المستصعب قياس الصفر المطلق. لا يمكنك قول إن لشيء ما قيمة صفر تام مطلقًا، أفضل ما يمكنك قوله إن له قيمة لا تزيد عن الريبة في قياسك. يقضي بعض الناس مسيرتهم العلمية كلها في قياس الأشياء مقتربين من الصفر، بدقة أفضل وأفضل.

- يا للملل.

- إنه يتطلب شخصية خاصة. على أي حال، هذا الموضوع ثانوي، نحن نعلم بوجود الجسيمات الافتراضية. ونستطيع رصد تأثيراتها.

- مهلًا، أنى لك رصدها إن كانت لا تعيش إلا مدة قصيرة جدًا؟

- لا يمكننا رصدها، ليس مباشرة. لكننا نعلم بوجودها لأننا نرى تأثيراتها في الجسيمات الأخرى. إذ يغير ظهورها من العدم واختفائها طريقة تفاعل الجسيمات الحقيقية فيما بينها.

- كيف؟

- صبرًا...

كل صورة تقص قصة:
مخططات فاينمان والكهروديناميكا الكمية

قد تبدو الجسيمات الافتراضية التي تظهر وتختفي بسرعة فكرة أكثر خيالية من أن توضع في نظرية علمية جدية. لكنها عنصر ضروري في نظرية الكهروديناميكا الكمية، التي تفسر تفاعل الضوء والمادة تفسيرًا جوهريًا. تصف هذه النظرية جميع التفاعلات بين الإلكترونات أو بين الإلكترونات والمجالات الكهربائية أو المغناطيسية بامتصاص الإلكترونات لفوتونات وإشعاعها لها.

تتمثل أشهر صيغة لنظرية الكهروديناميكا الكمية في صور تعرف بمخططات فاينمان، نسبة للفيزيائي الفذ والشخصية المبهجة ريتشارد فاينمان، الذي وضعها نوعًا من أنواع الاختصار الحسابي. تمثل هذه المخططات حسابات معقدة بصيغة صور تقص علينا قصة ما حدث عندما تفاعلت الجسيمات[6]. يتمثل أبسط مخططات فاينمان لتفاعل إلكترون مع مجال كهربائي أو مغناطيسي بالرسم:



[6] اشتهر فاينمان بنهجه الفيزيائي البديهي جدًا، وحظيت تقنية المخططات التي طورها بقبول واسع لأنها وفرت طريقة سهلة للتفكير في الحسابات المعقدة لنظرية الكهروديناميكا الكمية. في ذات وقت تطوير فاينمان لطريقته، وضع جوليان شفينجر نهجًا أكثر رسمية لذات المسألة، وهو يشبه نهج فاينمان في النتيجة لكن فيه رياضيات أكثر. يستخدم كلا النهجين بنحو واسع في فيزياء اليوم، وكوفئ فاينمان وشفينجر بجائزة نوبل في الفيزياء لعام 1965 بالاشتراك مع شينيتشيرو توموناغا الذي طور باستقلالية بعض التقنيات المشابهة للتي وضعها شفينجر.

يمثل الخطان المستقيمان إلكترونًا يتحرك في منطقة من الفضاء، ويمثل الخط المتعرج فوتونًا من المجال الكهرومغناطيسي. يتدفق الزمن في هذا المخطط من الأسفل إلى الأعلى، ويشير الاتجاه الأفقي إلى الحركة عبر الفضاء، لذا يكون المخطط أشبه بقصة في صورة: «كان يا ما كان»، كان هناك إلكترون، تفاعل وفوتون، فتغير مساره.

قد تعتقد أن هذه القصة القصيرة هي الصورة الكاملة لما حدث في أثناء تفاعل الإلكترون والضوء، لكن الاحتمالات تعد فلا تحصى بفضل الجسيمات الافتراضية. على سبيل المثال، يمكن أن يكون المخطط بهاتين الصيغتين:



يقص علينا هذان المخططان ذات القصة بأحداث أكثر: في المخطط إلى اليسار، هناك إلكترون يتحرك في الفضاء، وقبل أن يتفاعل وفوتون المجال الكهرومغناطيسي، أشع فوتونًا افتراضيًا[7] فتغير مساره. ثم امتص فوتونًا حقيقيًا من المجال، فتغير اتجاه حركته من جديد، بعد ذلك امتص الفوتون الافتراضي الذي أشعه قبل قليل. وفي المخطط إلى اليمين قصة أغرب، إذ تحول الفوتون الافتراضي -الذي أشعه الإلكترون- إلى زوجي إلكترون-بوزيترون[8] ثم أفنيا بعضهما متحولين إلى فوتون امتصه الإلكترون.

---

[7] أي جسيم يظهر ويختفي قبل نهاية «القصة» في مخططات فاينمان هو جسيم افتراضي.

[8] يمكن تمثيل البوزيترون رياضيًا بإلكترون يتحرك عكس مسار الزمن، وهي حيلة أخرى ابتكرها فاينمان، ولذا ترى السهم متجهًا للأسفل.

تظهر لنا هذه المخططات العلاقة الغريبة بين الجسيمات الافتراضية وقوانين الفيزياء الاعتيادية. تبدو الجسيمات الافتراضية غير مطيعة لبعض قواعد الفيزياء -مثلًا، يفترض ألا يتمكن الإلكترون من التحرك بسرعة كافية حتى يلحق الفوتون الافتراضي الذي يتحرك بسرعة الضوء فيمتصه- وذلك مسموح لها ما دامت لا تعيش بما يكفي لانتهاك ريبة الطاقة-الزمن. يشبه الأمر علاقة كلبة بالأثاث، إذ يمنع منعًا باتًا الوجود على الأريكة ما دام هناك شخص يراقبها، لكن ما دام المكان خاليًا، وبفرض أنها ستنزل قبل أن يراها أحد، فإن الأريكة مكان رائع لأخذ قيلولة.

يمثل كل مخطط من مخططات فاينمان جزءًا من قصة الأحداث التي ربما وقعت في التفاعل بين الإلكترون وفوتون مجال كهربائي أو مغناطيسي. ويخضع كل مخطط منها لحسابات الكهروديناميكا الكمية التي تعطي الطاقة النهائية للإلكترون، واحتمالية وقوع الحدث المصور. بالإضافة إلى ذلك، تقل احتمالية المخطط كلما زاد عدد الجسيمات الافتراضية التي فيه، لكنه يظل محتملًا، ما دامت الجسيمات تفنى بسرعة.

لا يتضمن المخطط في الصفحة السابقة غير إلكترونات وبوزيترونات وفوتونات، لكن يمكن ظهور أي جسيم حقيقي بهيئة جسيم افتراضي. رغم ذلك، تقل احتمالية ظهور جسيم ما بزيادة كتلته، لذا احتمالية ظهور زوجي بروتون-بروتون مضاد مثلًا لأقل جدًا من احتمالية ظهور زوجي إلكترون-بوزيترون (لأن البروتون أثقل من الإلكترون بألفي مرة تقريبًا)؛ لكن كل شيء ممكن نظريًا. إن انتظرت مدة كافية، حري بك توقع ظهور أي نوع وكل نوع من الجسيمات بهيئة جسيمات افتراضية، حتى الأرانب المصنوعة من الجبن.

- لا بأس، تؤثر الجسيمات الافتراضية في تفاعل الإلكترونات والفوتونات. ما المهم في ذلك؟

- يمكن أن يمثل الفوتون في مخططات فاينمان أي نوع من التفاعلات الكهربائية أو المغناطيسية. يمكن أن تصف هذه المخططات تفاعل إلكترون وإلكترون آخر أو بروتون، وهذه الأشياء تحدث طوال الوقت.

- ليست لدي فكرة عمّا تتحدث عنه.

- سأشرح لك، التعاطي مع الموضوع من ناحية نظرية الكهروديناميكا الكمية يعني التفكير في التفاعلات بأنها تبادل للجسيمات. فالإلكترونان اللذان يتنافران مع بعضهما يفعلان ذلك بتمرير فوتون من أحدهما إلى الآخر، أي إن أحدهما يبعث فوتونًا يقطع مسافة إلى الإلكترون الآخر الذي يمتصه. يغير هذه الانبعاث والامتصاص زخم الإلكترونات، فنرى ذلك قوةً تدفع الإلكترونين عن بعضهما.

- يبدو ذلك معقدًا! لماذا تفكر في الموضوع بهذه الطريقة؟

- لأنه أكثر إقناعًا رياضيًا. يمكنك أيضًا النظر إلى الموضوع بأنه طريقة طبيعية لتجسيد حقيقة ألا شيء يستطيع السفر أسرع من الضوء. في الصورة الكلاسيكية للقوى الكهربائية قبل آينشتاين، كان تغيير موضع أحد الإلكترونين يعني تغير القوة المسلطة على الإلكترون الآخر فورًا، بغض النظر عن المسافة التي بينهما. وهذا يتعارض مع النسبية التي لا تسمح بانتقال شيء بسرعة أكبر من سرعة الضوء.

- أوه. هذه مشكلة.

- بالفعل. لكن التفكير في القوى أنها فوتونات تُمرر من جسيم لآخر يحل المشكلة. فهي تنتقل بسرعة الضوء، والقوة لا تتغير إلى أن تصل الفوتونات.

- هذا يعني أن الفوتونات في هذه المخططات...

- ربما تكون فوتونات حقيقية، سببها تفاعل الإلكترون ومغناطيس أو

مجال كهربائي، أو ربما تكون فوتونات أشعها إلكترون آخر. التأثير نفسه في الحالتين، إذ يغير وجود الجسيمات الافتراضية التفاعل، ونستطيع رصد ذلك.

- ما زلت لم تشرح كيف نرصد ذلك.

- سأشرحها، لو توقفت عن المقاطعة.

- ...

أوثق نظرية علمية اختبارًا في التاريخ:
البراهين التجريبية لنظرية الكهروديناميكا الكمية

تظهر الجسيمات الافتراضية وتختفي في وقت قصير جدًا فلا نستطيع ملاحظتها. لكننا نعلم بوجودها لأن التفاعل معها يؤثر في سلوك الإلكترونات. ورغم أن هذا التأثير صغير جدًا، فقد استطعنا قياسه، وطابق القياس الفعلي التنبؤ النظري حتى أربعة عشر رقمًا عشريًا. وعلاوة على أن تجاربنا تؤكد صحة نظرية الكهروديناميكا الكمية، فهي قد توفر سبيلًا لاكتشاف جسيمات دون ذرية جديدة، بلا استخدام معجل الجسيمات الذي يكلف مليارات الجنيهات.

كيف اكتشفناها؟

نحن لا نستطيع تحديد أي حدث من الأحداث الكثيرة الممكنة قد وقع في تفاعل إلكترون معين، لأن الجسيمات الافتراضية تختفي بذات السرعة العالية التي تظهر بها.

يخبرنا ميكانيك الكم إن الجسيم الذي لا نعرف حالته الدقيقة سيكون في حالة تراكب من جميع الحالات الممكنة (حالة تراكب تشبه التي ناقشناها في الفصول السابقة). لذا حين يحسب الفيزيائيون تأثير تفاعل الإلكترون والمجال الكهربائي أو المغناطيسي، سيحتاجون إلى الأخذ بالحسبان جميع مخططات فاينمان الممكنة التي تصف العملية[9].

بمعنى آخر، يسلك الإلكترون في تحركه بين نقطتين جميع المسارات التي يمكن أن يسلكها بينهما في ذات الوقت. إنه يمتص فوتونًا واحدًا، لكنه أيضًا يبعث فوتون افتراضيًا ثم يمتصه، وهذا الفوتون الافتراضي يتحول

---

[9] نظريًا: هناك عدد لا نهائي من الأشياء المحتمل حدوثها، لذا عدد لا نهائي من المخططات الممكنة. عمليًا: كلما زاد تعقيد المخطط قلت مشاركته في الإجابة، لذا يحتاج الفيزيائيون النظريون إلى جمع عدد المخططات الكافي لمطابقة دقة التجربة وحسب.

ولا يتحول إلى زوجي إلكترون-بوزيترون. جميع هذه العمليات ممكنة الحدوث، لذا تشارك جميعها في التراكب بين مخططات فاينمان.

طريقة أخرى للتفكير في الموضوع هي بالإشارة إلى إننا لا نرى تفاعلًا بين إلكترون حقيقي وفوتون واحد، بل نرى التأثير التراكمي لتفاعلات كثيرة متكررة. إن استطعنا رؤية كل تفاعل بالتفصيل، سنرى أن الإلكترون يمتص الفوتون في أكثر المرات وحسب، بلا جسيمات افتراضية. ربما يشع الإلكترون فوتونًا افتراضيًا واحدًا مرةً في كل عشرة آلاف تفاعل. وينتج هذا الفوتون الافتراضي زوجي إلكترون-بوزيترون مرة في كل عشرة آلاف مرة، وهكذا. نضع بالحسبان أنه كلما حدثت إحدى هذه العمليات المختلفة، تغيرت الطاقة الكلية بمقدار ضئيل.

يشبه الإلكترون في هذا المثال كلبة تسير في الشارع. فرصة أن تتوقف الكلبة لشم أي نبتة صغيرة جدًا[10] لكن هناك الكثير من النباتات على جانبي شوارع الضواحي، ولا بد أن تكون إحداها مميزة وتستلزم مزيدًا من التحري بنظر الكلبة. سيحتاج الشخص الذي يمسك مقود الكلبة إلى أخذ هذا التأخير بالحسبان وهو يخطط لتمشيتها.

ليست لدينا القدرة على متابعة كل تفاعل من تفاعلات الإلكترون بتفصيل يتيح لنا معرفة عدد المرات التي تضمن فيها التفاعل جسيمات افتراضية، كما ليست لدينا القدرة على التنبؤ الدقيق بالنبتة التي ستتوقف الكلبة لشمها؛ لكننا نستطيع تمثيل تأثير ذلك في التفاعل عمومًا. يمكننا التفكير في جمع مخططات فاينمان بكونه حسابًا لمعدل التغير في طاقة الإلكترون بسبب امتصاصه لفوتون واحد حقيقي. ثم نصف التأثير التراكمي لامتصاص العديد من الفوتونات (الذي قد يتضمن جسيمات افتراضية أو لا يتضمنها) بسلسلة امتصاصات بذات معدل الطاقة، الأمر يشبه وصفنا

---

[10] ما لم تكن كلبة صيد من نوع الباسط، إذ سترغب في شم كل شيء مليًا.

تقدم كلبة في نزهة بالقول إنها ستتوقف بمعدل ثلاث مرات في كل شارع. ربما تتوقف خمس مرات في أحد الشوارع ومرة واحدة في غيره، لكن في المسيرة عمومًا، النتيجة هي كما لو أنها توقفت ثلاث مرات في كل شارع.

يظهر تأثير الجسيمات الافتراضية عند النظر في تفاعل إلكترون ومجال مغناطيسي، سواء فكرت في الأمر بكونه تراكبًا لجميع الطرق الممكنة في ذات الوقت، أو بكونه معدل تفاعل العديد من التفاعلات المفردة. للإلكترونات (وجميع الجسيمات المادية) خاصية تسمى «الدوران»، تجعلها تتصرف كما لو أنها مغانط صغيرة جدًا بقطبية شمالية وجنوبية[11]. تختلف طاقة الإلكترون الذي تحاذي أقطابه اتجاه المجال المغناطيسي عن طاقة الإلكترون ذي الأقطاب المعاكسة للمجال (بمقدار ضئيل جدًا).

ويعتمد اختلاف الطاقة بين هذه الحالات في المجال المغناطيسي على قيمة تسمى «النسبة المغناطيسية الدورانية»، أو عامل جي للإلكترون، وهو ينبئك بحجم المغناطيس الذي ينتج عن كمية دوران معينة. تنص النظريات الكمية التقليدية للإلكترون على إن هذه القيمة يجب أن تساوي «2» تمامًا، وهي القيمة التي سنقيسها إن لم تكن هناك جسيمات افتراضية. لكن القيمة الفعلية أكبر بقليل بفعل الجسيمات الافتراضية.

لقد قيست هذه القيمة بدقة استثنائية. في العام 2008، أجرى فريق من الفيزيائيين يقوده جيرالد غابرييلس من جامعة هارفارد أدق قياس لقيمة عامل جي للإلكترون إلى اليوم، وذلك في تجربة تضمنت وضع إلكترون في جهاز فخ بيننج. فكانت القيمة التي حصلوا عليها هي:

عامل جي= 2.00231930436146± 0.00000000000056

---

[11] تسمى بالدوران لأن التأثير يشبه ما سيحدث لو كان الإلكترون كرة شحنة تدور. الإلكترون لا يدور في الحقيقة، لكن الرياضيات هي نفسها في الحالتين.

قارن الفريق نتاجاته والنتاجات النظرية لحسابات الكهروديناميكا الكمية، التي تضمنت جمع قرابة الألف من مخططات فاينمان[12] (التي شملت عمليات أعقد بكثير من تلك التي وصفناها سابقًا)، فوجدوا تطابقًا رائعًا بين التجربة والنظرية يتوافق حتى أربعة عشر رقمًا عشريًا. لهذا السبب نقول بثقة إن الجسيمات الافتراضية موجودة، مهما بدت الفكرة غريبة.

هذا التوافق مذهل بحق، لكن عدم التوافق لأكثر إثارة! لا يعتمد عامل جي للإلكترون إلا على تأثيرات الفوتونات الافتراضية وأزواج إلكترون-بوزيترون الافتراضية، لكن الأمر مختلف لخصيصة مشابهة تعرف بعامل جي للميونات (الميون هو جسيم يشبه الإلكترون، لكنه أثقل)، إذ إنه يتأثر بجسيمات افتراضية أخرى أكثر غرابة[13].

لقد أثبتت أحدث التجارب اختلافًا طفيفًا بين القياسات التجريبية والنتاجات الحسابية للنظرية. قد يكون هذا الاختلاف مجرد خطأ حسابي أو عملي، لكنه ربما يكون إشارة إلى وجود جسيمات أخرى لم تضمن في الحسابات (جسيمات جديدة غير موجودة في النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات). ما زال من المبكر البت في هذا الموضوع، لكن إن بقي هذا الفرق في التجارب الأحدث، فربما سيمثل أول اختبار تجريبي داعم للنظريات العديدة لفيزياء ما وراء النموذج المعياري.

على أي حال، نؤكد أنه ما زال هناك طريق طويل ليقطعه التجريبيون قبل رؤية تأثيرات أرانب افتراضية مصنوعة من الجبن. لكن إن أمكن وجود أرنب من الجبن، فإنه قطعًا سيكون هناك في مكان ما.

---

[12] وهو إنجاز باهر، حققه فريق تويتشيرو كينوشتا في جامعة كورنيل.

[13] تتضمن حسابات عامل جي للميون ميونات افتراضية، وجسيمات تاو، وكواركات، وغلونات، ما يمثل معظم الأنواع المعروفة من الجسيمات دون الذرية.

- إذًا هذا ما قصدته حين قلت «ميكانيك الكم هي أكثر نظرية مجربة بدقة في تاريخ النظريات».

- لم أقل هذا حرفيًا...

- لا يهم. أنت دائمًا تقول أشياءَ مثلها، وهي جملة رنانة بحق.

- حسنًا، نعم، هذا ما قصدته. فقد استخدمت نظرية الكهروديناميكا الكمية للتنبؤ بعامل جي للإلكترون بدقة أربعة عشر رقمًا عشريًا، وهذا يتطابق مع القياسات التجريبية أحسن تطابق. والكهروديناميكا الكمية إنما امتداد مباشر نسبيًا لميكانيك الكم الاعتيادي فيتعامل مع حالات تتضمن النظرية النسبية.

- أهناك فوائد أخرى له؟

- كما قلت سابقًا، يمكن ظهور جميع أنواع الجسيمات بهيئة جسيمات افتراضية. هذا يتضمن الجسيمات التي تتنبأ بوجودها النظريات لكننا لم نرصدها بعد، لذا فإنها ستظهر بهيئة جسيمات افتراضية إن كانت موجودة فعلًا.

- ما فائدة ذلك؟

- تتيح بعض تلك الجسيمات النظرية تفاعلات لا يتيحها أي نوع من الجسيمات التي نعرفها حاليًا. علاوة على موضوع عامل جي للميون، فإن هناك «العزم ثنائي القطب» للإلكترون. وإن وجد النوع المناسب من الجسيمات، ستتغير طريقة تفاعل الإلكترون والمجال الكهربائي داخل الذرات والجزيئات. وقد يمكن رصد التغيرات الصغيرة في الحالات المسموح بها في التجربة باستخدام الليزر.

- هذا يعني أنك ستعلم بوجود نوع جديد من الجسيمات إن لاحظت ذلك العزم الذي ذكرته؟

- تمامًا. وأستطيع استبعاد بعض أنواع الجسيمات إن لم أره. لقد استبعدت حقيقة عدم رصد أي شخص لعزم ثنائي القطب في الإلكترون

بعض النماذج الأسهل التي يحب التجريبيون استخدامها. وإن لم ترصد التجارب الجديدة شيئًا فإن التجريبيين سيحيرون.

- هذا رائع.

- وبديع لأن هذه التجارب سهلة ولا تتطلب معجل جسيمات مكلف. تجري الكثير من المجموعات هذه التجارب -في بيركلي ويال وواشنطن وكولورادو وغيرها- إضافة إلى معجل الهدرونات الكبير، وعليهم الاعتماد لاكتشاف شيء جديد.

- وبالطبع، لا يساعد شيء من ذلك فيما هو مهم بحق.

- وهو؟

- توفير أرانب مصنوعة من الجبن.

- ماذا عساي أقول، ما زالت الفيزياء قاصرة في بعض المواضع.

الفصل العاشر

حذار من السناجب الشريرة:

إساءة استخدام الفيزياء الكمية

كنت أملأ مغذية الطيور -المضادة للسناجب- بالحبوب، حين بلغت أذني همسات: «بسس، أيها البشري!».

رفعت رأسي وإذ بسنجاب على فرع الشجرة يحدق إلي. تلفتت حولي بحثًا عن إيمي، لكنها كانت في الجانب الآخر من الحديقة، منشغلة بشم جذع شجرة البلوط الباسقة.

- ماذا تريد؟

- ما تقول في إعطائي بعض هذه الحبوب؟

- أقول لا. ثم ما هذا الذي على وجهك؟ أهو عثنون؟

- إنه مستعار. نحن نوهم الكلبة به، فتعتقد أننا من بعد آخر. على أي حال، ما رأيك ببيعي بعضًا منها؟

- أبيع؟ وما العملة التي قد يستخدمها سنجاب؟

- ما رأيك بطاقة مجانية؟

[بدا السنجاب واثقًا بنفسه رغم عثنونه المستعار وذيله المجعد وأسنانه الناتئة]

- طاقة مجانية؟

- نعم، يمكننا تعليمك كيف تستخرج طاقة غير محدودة من الماء الاعتيادي. ألا يكافئ ذلك بعض الحبوب؟

- حقًا! طاقة مجانية!

- بالتأكيد. يمكننا استخراج الطاقة الاهتزازية للنقطة الصفرية من جزيئات الماء، فتصبح في حالة طاقة أدنى من الجزيئات الاعتيادية. يمكنك تحويل تلك الطاقة إلى كهرباء توظفها في المصابيح أو الحواسيب أو آلة صنع حبوب الطيور.

- هذا أفضل من أن يكون حقيقة. ما هي تأثيراته جانبية؟ مخلفات سامة؟

- لا، أبدًا. المخلفات الوحيدة هي الماء. وهو أفضل من أي مياه أخرى، إنه ماء خارق!

- ما الخارق فيه؟

- حسنًا، إنه في حالة كمية مختلفة، أليس كذلك؟ لذا فيه خصائص مميزة وما شابه. يمكنك شفاء الأمراض بشربه!

- وكيف سيشفي الأمراض؟

- كل ما عليك فعله هو شربه، والتركيز على قياس دالتك الموجية لتكون بحالة صحية. إن فعلت ذلك على نحو صحيح، ستستطيع بلوغ أتم الصحة عبر التفكير وحسب.

- كيف اكتشفت هذا يا فلتة زمانك؟

- لدينا ورش وصفوف وأشياء. أنا أبلغ مئة وست سنين وفي صحة ممتازة. سنبوح لك بالسر مقابل حفنة حبوب فقط.

- حقًا!

[ما زالت الكلبة في الجانب الآخر من الحديقة، تتفحص الشجيرات بحثًا عن الأرانب]

- يمكنك استخدامه لتشغيل الحواسيب الكمية كذلك، لكن هذا السر سيكلفك أكثر من الحبوب. أعطنا علبة فول سوداني كل أسبوع وسنعطيك مخططات صنع حاسوب كمي قادر على اختراق تشفير بطاقات الائتمان.

- عجبًا!

- رائع، أليس كذلك؟

- لقد أصابت الكلبة، إنكم لسناجب شريرة.

- كأنك لن تفعلها إن استطعت. على أي حال، ألن تعطيني بعض الحبوب؟

- لا بأس سأعطيك بعضها.

وضعت حفنة حبوب على الأرض، على بعد مترين تقريبًا من جذع الشجرة. وبعد أن شكرني السنجاب ونزل مهرولًا، وقفت بينه وبين الشجرة وناديت إيمي، رَفَعت رأسها فأضفت «انظري! سنجاب شريرا!». اندفعت عبر الحديقة مكشرة عن أنيابها. حاول السنجاب الهرب عائدًا إلى الشجرة لكنني منعته فاستدار نحو شجرة القيقب في آخر الحديقة والكلبة في إثره.

• • •

تحدثنا في الفصول السابقة عن الكثير من السمات الغريبة والرائعة لميكانيك الكم. منها الازدواجية الموجية الجسيمية والقياس الكمي وارتباطات إي بي آر والجسيمات الافتراضية... تعارض جوانب كثيرة من النظرية الكمية مفاهيمنا المكتسبة لدرجة أنها تبدو كالسحر. إنها تبدو غير خاضعة لأي قاعدة اعتيادية، فقد يخيل لنا أن كل شيء ممكن.

هذا سوء فهم شائع لميكانيك الكم، وستصادفه في أماكن كثيرة. سيظهر لك بحث يسير في محرك غوغل عشرات النتاجات لمواقع توفر شتى الطرائق الـ«كمية» لإنتاج الطاقة المجانية، وتحسين صحتك وحياتك، بل وحتى جعلك فاحش الثراء. يجني الكثير من أولئك الناس المال بتسويق ميكانيك الكم على أنه سحر.

لكن ميكانيك الكم ليس بسحرٍ مهما بدا غريبًا ومذهلًا. إنه نظرية علمية

خاضعة لمبادئ الفيزياء الأساسية. وضع كلمة «كمي» في اسم جهاز أو ظاهرة لا يجعله قادرًا على خلق الطاقة من العدم ولا إرسال الرسائل أسرع من الضوء؛ هذه المبادئ راسخة في بنية الكون العميقة. وليس ميكانيك الكم خاضعًا لهذه المبادئ والقواعد وحسب، بل إنه سبب لبعضها أحيانًا.

على الرغم من ظاهرية تحدي تنبؤات النظرية الكمية لحدسنا اليومي بشأن آلية العالم، فإنها لا تعارض جميع قواعد الحس العام. على نحوٍ خاص، إنها لا تعارض أهم قاعدة في الحس العام، وهي: إن بدا شيء أفضل من أن يكون حقيقيًا، فإنه ليس حقيقيًا.

استثمرنا معظم هذا الكتاب في الحديث عن السمات الرائعة للنظرية الكمية، لكني أريد ختمه بالتحذير. يسوق الكثير من الناس نسخًا مغلوطة من ميكانيك الكم جاعلين النظرية سحرًا، ويعرضون أشياءَ لا تطالها أكثر أحلامنا جموحًا. بعض أولئك الناس نصاب، وبعضهم طيب لكنه واهم، وكلهم مخطئ. قد يصعب تمييز الواهم من النصاب، لكن فصل النسخ المغلوطة عن النظرية الكمية ليس بتلك الصعوبة. وسأشير في هذا الفصل إلى بعض أشهر الادعاءات الزائفة.

غداء «كمي» مجاني: الطاقة الحرة

«الطاقة الحرة» هي من أهم المجالات التي يعمل فيها النصابون الذين يستغلون النظرية الكمية. دائمًا ما يزعم محتالو الطاقة الحرة أنهم اكتشفوا طريقة لإنتاج كمية كبيرة من الطاقة لقاء عمل ضئيل.

لهذه الفكرة وجوه كثيرة، لكن الإغواء نفسه دائمًا: استثمر كمية قليلة من العمل، واحصل على كمية كبيرة من الطاقة (الكهربائية). وبالطبع لا يتطلب الأمر إلا استثمارك بعض المال للحصول على النظام الأولي الذي سيعتقك من عبوديتك لوزارة الكهرباء إلى الأبد...

الأمر لا يعدو ادعائهم اختراع آلة حركة دائمة، وقد عرف الفيزيائيون منذ مئات السنين استحالة وجود هكذا آلات، والفيزياء الكمية لا تغير المعادلة.

أشهر تفسير زائف لآلة الحركة الدائمة «الكمية» أنها تستغل طاقة النقطة الصفرية لأحد الأنظمة. طاقة النقطة الصفرية حسب الفيزياء الكمية هي أقل حالة طاقة ممكنة في نظام. إنها الطاقة المتبقية في النظام الكمي بعد استخراج كل الطاقة التي يمكن استخراجها منه، أي بعد تقليل الطاقة الحركية للنظام إلى أقل قيمة ممكنة وعزله عن التفاعلات الخارجية التي قد ترفع طاقته الكامنة.

يحب النصابون عد نقطة الطاقة الصفرية مصدرًا يمكن استغلاله، إنهم يقولون: ما زال هناك بعض الطاقة. ويستطيع جهازنا استغلالها لتشغيل آلة الحركة الدائمة إلى الأبد.

لكننا رأينا في الفصل الثاني أن نقطة الطاقة الصفرية موجودة لأن المادة ذات طبيعة موجية، أي إن لجسيماتها أطوال موجية دائمًا. وكون طاقة نظام تساوي صفرًا مطلقًا، يعني أن جسيماته يجب أن تكون ساكنة تمامًا، وهذا مستحيل لأي نظام موجي. نقطة الطاقة الصفرية هي إحدى آثار الطبيعة الموجية للمادة، كما مبدأ الريبة لهايزنبيرغ. وكما يستحيل تجنب

الحدود التي يفرضها مبدأ الريبة، يستحيل استخراج طاقة النقطة الصفرية لتوظيفها في أشياء مفيدة. تشبه محاولة استغلال طاقة النقطة الصفرية طلب نصف فوتون؛ كلاهما غير منطقي.

من المرجح أن أذكى مقترح للطاقة الحرة من نظرية الكم المزيفة هو ذلك الذي تقدمه شركة بلاك لايت بَوَر. أمضى بوب بارك من جامعة ميريلاند وجمعية الفيزيائيين الأمريكيين عشرين سنة تقريبًا في تفنيد مزاعم مؤسس هذه الشركة راندل ميلز، وهذا مستعرض باستفاضة في كتاب بارك «علم الفودو: الدرب من الحماقة إلى الاحتيال» المنشور عام 2000.

على الرغم من جهود بارك، فإن هذه الشركة ما زالت قائمة وتروج لآلية طاقة متجددة «فذة»، وكما يقولون في موقعهم: «تتحرر الطاقة عبر تحفيز إلكترونات ذرات الهيدروجين بعامل محفز ينقلها إلى مستويات طاقة أدنى {نقلها إلى مستوى دون المستوى القاعدي حول النواة} تساوي جزءًا من الأرقام الكمية». تسمى ذرات الهيدروجين مخفضة المدار الغريبة هذه بالهيدرين، ويُزعم أن لها شتى الخصائص السحرية مثل تشغيل بطاريات عالية الفولتية جديدة ومصادر إضاءة خارقة (وجميعها غير متوفر بعد، لكنهم يعدوننا بقرب إنتاجها!).

يبدو هذا الكلام علميًا بشدة، لكن كلبًا يمكنه معرفة زيفه وتفاهته. الهيدروجين هو أبسط ذرة في الكون، تتألف من إلكترون يتيم يدور حول نواة فيها بروتون وحيد. لقد وضع نيلز بور أول نموذج كمي لها في العام 1913، وطور فهم كمي تام لها عبر تطبيق معادلة شرودنغر عليها في العام 1920. كذلك طبقت نظرية الكهروديناميكا الكمية لأول مرة على ذرة الهيدروجين في العام 1947، ويتوافق نموذجها الحديث لذرة الهيدروجين مع النتاجات التجريبية بدقة رهيبة تماثل دقة قياسنا لعامل جي للإلكترون. ذرة الهيدروجين هي من أكثر الأنظمة المفهومة والمختبرة بدقة في الكون.

ليس في الفيزياء الحديثة مجال لحالات «أدنى من الحالة الأرضية» في الهيدروجين. وجود هكذا حالات يعني أن فهمنا للفيزياء الأساسية مغلوط كثيرًا، فيستحيل تحقيق توافق الأربعة عشر رقمًا عشريًا الذي حققناه بين التجربة ونظرية الكهروديناميكا الكمية.

هناك مصدر آخر من مصادر الطاقة الحرة «الكمية» كثيرًا ما يشار إليه، وهو يسمى بـ«طاقة الفراغ». وهذا مجرد وجه آخر لمشروع طاقة النقطة الصفرية، فهو يستغل طاقة النقطة الصفرية للفضاء الفارغ، أي الظهور والاختفاء المستمر للجسيمات الافتراضية التي تقر نظرية الكهروديناميكا الكمية بوجودها.

ليس مشروع «طاقة الفراغ» ممكنًا أكثر من فكرة طاقة «الهيدرين». نعم يحتوي الفضاء الفارغ على طاقة بصورة جسيمات افتراضية، لكن هذه الجسيمات تظهر عشوائيًا وتختفي مجددًا في جزء صغير من الثانية. ليست هناك طريقة نجبر فيها الإلكترونات على الظهور عند الطلب، ولا وسيلة لجعلها تعيش بما يكفي لتوظيفها في أشياء مفيدة. بالنتيجة: تؤثر طاقة الفراغ في الإلكترونات وسائر الجسيمات على نحوٍ ضئيل، لكنها ليست مصدرًا يمكن استغلاله.

إنَّ أي دعوة لطاقة حرة او حركة دائمة هي أساسًا زعمٌ أنك تستطيع الحصول على شيء دون مقابل. وأي كلب يعلم في صميمه أن هذا غير ممكن، إذ لا سبيل للمقرمشات دون تأدية حيلة ما. وضع كلمة «كمي» في الجملة لا يغير الحقيقة الجوهرية: لا يمكنك الحصول على شيء دون مقابل. واعلم أن أي زاعم لغير هذا إنما نصاب أو منصوب عليه.

- ألم تقل بإمكانية تحول الجسيمات الافتراضية إلى حقيقية؟ كما في إشعاع هوكينغ!

- نوعًا ما. الحقيقة إن زوجي إلكترون-بوزيترون يظهران في حافة الثقب الأسود، فيقع أحدهما في الثقب الأسود ويفلت الآخر.

- وهذا يعني أن الإلكترونات تخلق من العدم!

- خطأ. يخسر الثقب الأسود شيئًا من كتلته بتحول الإلكترون الافتراضي إلى حقيقي. أي إن الطاقة اللازمة لخلق الإلكترون لا تنتج من الفراغ بل من الثقب الأسود؛ الذي يصغر شيئًا فشيئًا، جسيمًا افتراضيًا تلو آخر.

- إذًا، هذه العملية لا تفيد مصدرًا للطاقة؟

- كلا، ليست مصدر طاقة. حتى افتراض إمكانية السيطرة على ثقب أسود لإنتاج الطاقة يجعل الثقب الأسود يفقد كتلته شيئًا فشيئًا كأي مصدر طاقة. ليس هناك غداء مجاني أبدًا.

- ليس صحيحًا. أنت لا تأخذ مني ثمن الغداء، أو العشاء، ولا الفطور، ولا حتى الوجبات الخفيفة...

- لأنك تكسبين طعامك بحراسة المنزل من السناجب الشريرة! وبالحديث عنها...

حسن صحتك بالقياس: «الشفاء الكمي»

الطب «البديل» هو ثاني أهم المجالات التي يعمل فيها النصابون الذين يستغلون النظرية الكمية. يعج الإنترنت ومتاجر الكتب بنصابين يسوقون ميكانيك الكم على أنه سر الحياة الطويلة الصحية المليئة بالخيرات.

يستند أشهر هذه المزاعم إلى القياس الكمي. إذ يشير المحتالون إلى كون الحالات غير محددة في النظرية الكمية حتى تقاس. ثم يردفون بكون السر يكمن في قياس حالتك صحيحًا وحسب. إنهم يزعمون أنك تستطيع الخلود بإجراء تجربة تأثير زينون الكمي على نفسك! فإن استمررت بقياس نفسك في حالة صحية، سيجعلك القياس الكمي لا تمرض أبدًا.

يتجلى أفضل مثال لهذا النوع من الدجل الكمي في كلام ديباك شوبرا، مؤلف كتاب عنوانه «الشفاء الكمي»، وهو بداية سلسلة أكثر كتب الطب البديل مبيعًا. قد تسأل ما هذا الشفاء الكمي؟ فأجيبك بقول شوبرا من مقابلة[1] بتاريخ 1995:

«الشفاء الكمي هو علاج العقلية الجسدية في المستوى الكمي. أي من مستوى خفي عن المستوى الحسي. أجسادنا هي مجالات من معلومات وذكاء وطاقة في النهاية. ويسبب الشفاء الكمي تغيرًا في مجالات معلومات الطاقة، لتحقيق تصحيح في فكرة زلت. لذا، يعتمد الشفاء الكمي على شفاء نمط وعي هو العقل لتحقيق تغيّرات في نمط وعي آخر هو الجسم»

يقول شوبرا مصطلحات كثيرة تبدو علمية، لكنها مجرد لغو فارغ. ولا تزيد الرصانة العلمية في كلامه عن رصانة الرطانة التقنية في مسلسلات الخيال العلمي.

[1] يمكنك مشاهدتها عبر هذا الرابط: www.healthy.net/scr/interview.asp?ID =167

يتوسع شوبرا في هذه الأفكار في كتابه «جسد لا يشيخ وعقل لا يحده زمن»، الذي يَعِدُ بـ«بديل كمي للشيخوخة». يظهر تفسيره لأسس أفكاره الفيزيائية جهلًا مركبًا بالتاريخ، فهو يعلن بثقة: «علَّمنا آينشتاين أن الجسم المادي -أسوة بجميع الأشياء المادية- مجرد وهم؛ وتشبه محاولة التلاعب به إمساك الظل وإغفال المادة»[2]. وهذا يكاد يكون نقيض فكرة آينشتاين التي رأيناها في الفصل السابع (صفحة 165)؛ فقد كان شديد الارتياب بشأن فكرة عدم التحديد الكمي، التي ينقلها شوبرا أشد نقلة حين يجادل ألا شيء موجود حقًا:

«من الخطأ أن نعتقد بوجود عالم مستقل «في الخارج»، لعدم وجود كميات مطلقة في العالم المادي. ما العالم إلا انعكاس للأجهزة الحسية التي تدركه... كل ما «في الخارج» واقعًا هو بيانات خام غير مشكلة تنتظر أن تفسرها أنت، المتسلم. أنت تتسلم [حساءً كميًا متدفقًا مبهمٌ جذريًا] كما يسميه الفيزيائيون[3] وتخثره للعالم الثلاثي الأبعاد الصلب بفضل حواسك»[4]

بينما يعترف شوبرا أن هذا الهبوط إلى الذاتية قد يبدو «مقلقًا»، ربما لأن الحساء المتخثر يبدو غير جذاب، فإنه يراه ميزة لا علة، فيكتب «يوجد تحرر عظيم في إدراك إمكانيتك لتغيير العالم -بضمنه بدنك- بمجرد تغيير إدراكك». بعبارة أخرى، بما أن لا شيء موجود حقًا، فلم لا تكون شابًا وغنيًا وبصحة ممتازة. الأمر كله مسألة إدراك، أو قياس للدقة.

---

[2] الصفحة 10.

[3] ليس منطقيًا جمع كلمة فيزيائي في هذا النص، وليست جملة «حساء كمي متدفق مبهم جذريًا» شائعة عند الفيزيائيين. يبدو أن الفيزيائي الوحيد الذي استخدمها هو نِك هربرت، وهو يروج لفكرة عنوانها «التنترا الكمية»، ورصانتها العلمية واضحة من اسمها.

[4] الصفحة 11.

في فكرة الشفاء الكمي باستخدام الطبيعة المؤثرة للقياس الكمي مشكلتان أساسيتان كبيرتان. تتمثل الأولى بكون شوبرا وأمثاله يطبقون الأفكار الكمية على أنظمة أكبر من أن تظهر تأثيرات كمية. فكما رأينا مرارًا وتكرارًا في هذا الكتاب، التأثيرات الكمية عصية الاستخلاص، وتصعب ملاحظتها بزيادة حجم النظام الذي يدرس. يتمثل أكبر جسم لوحظ في حالة تراكب كمي بمجموعة قوامها مليار إلكترون تقريبًا (راجع الفصل الرابع، صفحة 118)، في حين لم نظهر تأثير زينون الكمي إلا في الجسيمات المفردة (راجع الفصل الخامس، صفحة 133).

أما المشكلة الثانية، وهي الأكبر، فتتمثل بكون القياسات الكمية عشوائية أصالةً. فحالات النظام الكمي غير محددة حتى تقاس، ولا يمكن التنبؤ بنتيجة قياس منفرد.

لا يمكن أبدًا معرفة ما ستكون عليه نتيجة قياس كمي معين مقدمًا، بغض النظر عن إن كنت من أنصار تفسيرات تشابه تفسير كوبنهاغن حيث تنهار الدالة الموجية متخذة قيمة واحدة، أو من أنصار تفسيرات تشابه تفسير العوالم المتعددة حيث تتسلم فرعًا واحدًا من دالة موجية دائمة التوسع، ولا حتى إن آمنت بتفسير الحساء المتصلب لشوبرا؛ الأمر مفروغ منه.

ربما يوجد فرع من الدالة الموجية للكون حيث تنعم الكلاب بصحة ممتازة وأرانب سمينة بطيئة لا تحصى، لكننا لا نستطيع التلاعب بمخرجات القياس لنصل إلى ذلك الكون. لا التأمل ينجح ولا العقاقير تنجع ولا التفكير الإيجابي ينفع؛ لا توجد طريقة معروفة للتأثير في بنية الكون الكمية لاستيلاد نتاج معين لقياس كمي، ولا دراسة علمية تشير إليه أو تذكره ولو تلميحًا.

إن أمكن تحقيق أشياء عظيمة بمجرد الرغبة فيها لما شقي الفيزيائيون في برهنة التأثيرات الكمية ولا احتاروا بتأمين تمويل لأبحاثهم، ولا نقص مخزون الكلاب من اللحم والجبن والأرانب.

لربما يخفض التأمل مستوى توترك، ولعل التفكير بإيجابية يحسن مزاجك، وعساهما يشعرانك أنك أكثر حظًا في الحياة، فيساعدانك في صيد ذلك الأرنب الذي تريده. لكن ليس في ذلك شيء كمي، ولست بنافذ إلى بنية الكون العميقة ولا مستغلها ولو بسلطان.

• • •

- أنت محق بشأن التأمل. إنه يساعدني كثيرًا في خفض توتري.

- منذ متى تتأملين!

- منذ الأزل. لدي طبيعة بوذية. أحب التأمل تحت ضياء الشمس في الحديقة.

- هذا ليس بتأمل، إنه نوم. عيناك مغلقتان وأنت تشخرين.

- ذلك ليس شخيرًا... إنه، مانترا.

- يا لسخافتك. وما التوتر الذي عندك على أي حال؟

- أوه، حياتي صعبة جدًا. عليَّ القلق ما إن كنت سأنام في غرفة المعيشة أو غرفة الطعام أو المكتب. وأتوتر وأنا أفكر في سبب عدم تربيتك عليّ، ولماذا لا تعطيني مقرمشات...

- حسنًا يكفي. أنتِ تسببين لي صداعًا.

- جرب التأمل!

الشفاء الشبحي بالتشابك الكمي: «الشفاء عن بعد»

زعم أن اللامحلية الكمية أساس لطب «بديل» أو «تقليدي» هو نوع شائع آخر من الدجل الكمي. يعتقد المؤمنون به أن هناك مستوى واقع عميق أو «فائق» تثبته الترابطات في مبرهنة بل وتجارب أسبيه. يسبب هذا المستوى -كما يزعمون- ترابطًا بين الأحياء كافة، ويمكن للممارسين استخدام هذا الترابط لتشخيص الأمراض وعلاجها دون لمس الناس. ويزعمون أيضًا إن هذا المستوى هو سبب ظواهر الإدراك خارج الحواس (الحاسة السادسة).

نقرأ أكثر نسخة متطرفة من هذه الفكرة في كتب مثل «الشفاء عن بعد» المنشور عام 2008 لجام أنجيلو، الذي يزعم:

«يؤمن علماء ميكانيك الكم أن نظرية المجال الموحد تربط كل شيء في الكون بضمنها الجاذبية والتفاعل النووي والمجالات الكهرومغناطيسية والوعي البشري. هذا يعني أن الفيزياء الحديثة تتفق مع اكتشاف الشفاء عن بعد بشأن إمكانية سفر الأشكال الفكرية -مثل الأفكار والمعلومات- من جزء من العائلة البشرية إلى آخر عبر شبكة من الوعي»[5]

لا يعدو هذا عن كونه خرافات خيال علمي. لا توجد «نظرية مجال موحد» في الفيزياء، ويمثل غيابها إحدى معضلات الفيزياء الحديثة. لكنها حتى إن وجدت لن يكون «الوعي البشري» من عناصرها.

تفصَّل هذه الفكرة أكثر، بتفسيرات مغلوطة أكثر، في كتاب تيفاني سنو «انطلاقًا من العقل: الشفاء عن بعد والوجود المزدوج والحدس الطبي والصلاة في العالم الكمي» المنشور عام 2006، تحديدًا في الفقرة التالية:

---

[5] الصفحتين 180- 181.

«التشابك (يسمى أحيانًا اللامحلية) هو حيث تنتقل الإشارات الأسرع من الضوء بين جسيمين يظلان مرتبطين بطريقة ما مهما كانت المسافة بينهما شاسعة. فما يحدث لأحد الجسيمين يصيب الآخر فورًا بفضل التواصل الموجي المتشابك، حتى إن فصلت بينهما مجرة. وحين ننظر في نظرية الانفجار العظيم وكيف بدأ الكون، فإننا نرى أن جميع الطاقة (بضمنها نحن) كانت في حالة تشابك في البداية، لذا فإننا جميعًا نشترك في البدء وإن كنا بعيدين. بأبسط تعبير: ما يفعله أحدنا يؤثر في البقية»[6]

تبدأ الفقرة بتفسير خاطئ قليلًا يزداد خطأً حتى يخرج من حدود المنطق في نهايتها. كما رأينا في الفصل السابع، يسمح التشابك بترابطات لامحلية بين حالات الجسيمات المتشابكة بالفعل. لكن هذه الترابطات يجب أن تؤسس بتفاعلات محلية في البداية، كما في الفوتونات في تجربة أسبيه إذ نتجت من ذات الذرة.

علاوة على ذلك، الترابط الكمي بين هذه الجسيمات المتشابكة هش جدًا، ويسهل أن تدمره تفاعلاتها مع الكون، التي تسبب فك الترابط. يشقى الفيزيائيون لإنتاج تشابك يدوم لعُشر ثانية وحسب. لذا من المستبعد نجاة اتصال تشابكي نشأ في وقت قريب بعد الانفجار العظيم.

لا يوجد تواصل متوارث بين الأجسام المنفصلة، لعدم بقاء أي تشابك من الانفجار العظيم. يمكنني بكل سهولة ترتيب حالات كلبين لأجعلهما مترابطين (كما قلنا في الفصل السابع، صفحة 164) لكن فقط بجمع الكلبين والسماح لهما بالتفاعل فيما بينهما. فلا يمكن أن يتشابك الكلبان إن كانا منفصلين. بذات المبدأ، وحتى بإهمال حقيقة أن الأعضاء البشرية أكبر من تظهر سلوكًا كميًا، لا يمكن تأسيس اتصال بين كبد مريض مثلًا وكف المعالج دون نوع من التواصل بينهما.

---

[6] الصفحة 31.

يعزى إلى التشابك أيضًا تفسير عمل المعالجة المثلية[7]. حيث توضع كميات دقيقة من الأعشاب أو السموم في الماء، ثم يخفف المحلول فلا تظل فيه جزيئة ظاهرة من تلك المواد. يزعم المعالجون به أن الماء «يتذكر» حضور المواد الأصلية، ويكتسب بعض صفاتها ما يجعله ماءً شافيًا لكل من يشربه! يعزى تأثير التذكر هذا إلى التشابك أحيانًا، قائلين إن التفاعل بين الماء والأعشاب أو السموم يؤسس اتصالًا بينها عبر خطوط الترابط الملحوظة في تجارب أسبيه.

نرى أعلى درجات تفسير المعالجة المثلية بالتشابك الكمي في عمل ليونيل ميلغروم، الذي يزعم تضمن العملية لا التشابك بين الماء والأعشاب وحسب، بل تشابكًا ثلاثيًا بين المريض والمعالج والعلاج (يسميه تشابك م-م-ع).

لميلغروم قدرة فذة على محاكاة مصطلحات الفيزياء الكمية وأفكارها، وكتب في ورقة مؤرخة بالعام 2006:

«يجب أن يمكن استخدام مفاهيم التشابك الكمي (بضمنها آلية معالجة المعلومات) لتوضيح سمات معينة لعملية المعالجة المثلية وغيرها من أنواع الـ«طبت»[8]. بناء على ذلك، يجب أيضًا أن تكون تأثيرات تحري المعالجة المثلية وغيرها من الطبت باستخدام تدابير التجربة العمياء سهلة الانقياد لهكذا توضيحات. لذا قد يمكن، في الإثباتات مزدوجة العماء، عد كل عنصر من عناصر حالة تشابك م-م-ع بأنه «كيوبت كبروي» ثنائي الحالة... وهكذا، وضمنيًا، ربما يمكن عد عملية المعالجة المثلية تتضمن انتقالًا فوريًا كميًا كبرويًا... غير أن الحالة المتشابكة هي وحدها ما يحتوي على معلومات عن النظام بأكمله. نستنتج إذًا أن أي شيء يحطم حالة التشابك سيؤدي بالضرورة إلى فقدان معلومات عن

---

[7] أو الطب التجانسي، وهو أحد أنواع الطب البديل الذي يعتمد على مقولة «المثل يعالج المثل».

[8] «الطبت»= «الطب البديل والتكميلي». الاختصارات تجعل أي شيء أكثر علمية.

تكامل دالة الأنظمة بصفتها نظامًا كاملًا. ومن الواضح إمكانية حدوث هذا في [تجارب المراقبة العشوائية مزدوجة العماء[9]] المختصة ببحث كفاءة المعالجة المثلية، حيث يُحذَف المريض أو المعالج أو العلاج من سياقهم العلاجي المتشابك»[10]

هذا توظيف ساحر للمنطق «الكمي». فلا يعزو ميلغروم نجاع أدوية المعالجة المثلية إلى هذا «الانتقال الفوري الكمي الكبروي» وحسب، بل يستغل هذه الحجة ليبرر فشل المعالجة المثلية في التفوق على سائر الطب الوهمي في التجارب السريرية العلمية.

الأمر كله كمي كما يزعم، حيث يدمر قياسُ الكفاءة حسب المعايير المتوافقة مع المبادئ العلمية كلَّ شيء. يستنتج ميلغروم عدم قدرة استخدام آليات الاختبار الطبية المعيارية لقياس نجاح عمليات المعالجة المثلية لأنها «تدمر التأثيرات التي يُزعَم أنها صممت لدراستها»؛ هذه محاولة ذكية لاستخدام ميكانيك الكم (ربما عبر الانتقال الفوري أو ظاهرة النفق الكمي) عذرًا لتجنب المعايير الدقيقة التي تخضع لها العلاجات الطبية التقليدية.

ادعاء تفسير التشابك للمعالجة المثلية للغو فارغ تمامًا. لأن المرضى والمعالجين أكبر من إظهار صفات كمية، وحتى مع وجود احتمالية ضئيلة جدًا لحدوث تفاعل تشابكي بين الجزيئات في المحلول، فإن التشابك هو مجرد ارتباط بين حالات نظامين؛ بمعنى حين تكون ذرة في حالة محددة يكون الفوتون مستقطبًا عموديًا، أو حين يكون أحد الكلبين مستيقظًا يكون الآخر كذلك. هذا لا يعني إن أحد النظامين يكتسب صفات النظام

---

[9] تجارب المراقبة العشوائية مزدوجة العماء هي اختبارات طبية يُختار فيها -على نحو عشوائي- تسلم المرضى إما للدواء المراد اختباره وإما لعلاج وهمي، ولا يعرف المريض ولا الطبيب الذي يوزع العلاجات أيها وهمي وأيها حقيقي. تمثل هذه الاختبارات المعيار الذهبي للبحث الطبي الحديث.

[10] من دورية «الطب البديل والتكميلي القائم على الأدلة» بتاريخ 16- 7- 2006 الصفحة 14.

الآخر. بعبارة أخرى: يسبب التشابك الكمي ترابطًا بين ذرة وفوتون مثلًا، لكنه عاجزٌ عن تحويل الذرة إلى فوتون أو الماء إلى إكسير شفاء، كما الترابط بين كلبين عاجزٌ عن تحويل أحدهما من لابرادور ريتريفر إلى بوسطن تيرير.

حذار من السناجب الشريرة: الفيزياء الكمية ليست سحرًا

الفيزياء الكمية نظرية عجيبة غريبة، تتيح لنا إنجاز أشياءَ رائعة. تعتمد معظم التقنيات الحديثة على الفيزياء الكمية بنحو أو بآخر، مثلًا تستند الأجهزة الإلكترونية الحديثة في عملها إلى التأثيرات الكمية، كذلك الأجهزة البصرية مثل الليزر والثنائي الباعث للضوء LED المستخدمة في الاتصالات عن بعد هي أجهزة كمية في أساسها. يؤمل أن تكون هذه النظرية حجر أساس تقنيات مستقبلية عظيمة مثل الحواسيب الكمية التي يمكنها حل مسائل معينة أسرع مما يستطيع أي حاسوب تقليدي، ومثل أنظمة التشفير الكمي التي تحمي الرسائل بشفرات لا يمكن اختراقها بأي وسيلة.

لكن، وعلى الرغم من روعة نتاجات الفيزياء الكمية، فإنها لا تحقق المستحيل. نعم تعارض تنبؤات النظرية بديهتنا، لكنها عمومًا لا تتجاوز المنطق السليم بالكامل. لذا إن وعدك أحدهم بأشياء أفضل من أن تكون حقيقية، فأرجح الظن أنه يكذب عليك أو على نفسه. وضع بعض الكلمات الكمية الرنانة في التفسيرات لا يجعل الطاقة المجانية ممكنة ولا يحقق أمنيات الشباب الأبدي.

هناك الكثير من الجوانب الفاتنة للنظرية الكمية التي لم نستعرضها في هذا الكتاب. والكثير من السناجب الشريرة في العالم، بعثنون وبدونه. لذا فكر مليًا في المزاعم المرتبطة بالتأثيرات الكمية، وتذكر دائمًا أن النظرية ليست سحرًا رغم غرابتها. إن فعلت ذلك، لن يصعب عليك ملاحظة الجوانب الفاتنة للكون الكمي، ولا تجنب الدجالين والمجانين.

• • •

- يا للأسف، هذا محبط جدًا!

- لماذا؟ لا تحتاج النظرية الكمية إلى السحر لتكون رائعة.

- لا، ليس هذا. أعني الدجالين. أنا أعلم أن السناجب شريرة، لكني كنت أجهل أن من البشر من هم بذات السوء.

- نعم، من المحبط رؤية نظرية جيدة تستغل بتلك الطريقة. لكنها علامة تحسن نوعًا ما!

- كيف؟

- لأننا إن عدنا إلى القرن التاسع عشر، سنرى من ينسج ذات المزاعم السحرية حول الكهرباء. اقترحت في وقتها شتى الأجهزة غير المنطقية التي زعم أنها تؤدي أشياءَ سحرية لكونها تعمل بالكهرباء!

- حقًا؟

- وفي منتصف القرن العشرين، كانت المزاعم تنسج حول الطاقة الذرية أو النووية. إذ اقترح الناس حينها استخدام الطاقة النووية لأسخف الأشياء، وبنيت شتى أنواع الاحتيال على أساس الطاقة النووية.

- ما زلت لم أفهم، كيف تعدها علامة تحسن؟

- حسنًا، لأن الناس لم يعودوا يصدقون أيًا من تلك المزاعم. لقد اعتدنا على الطاقة الكهربائية والنووية، ولا يؤمن الناس حاليًا بالمزاعم السخيفة التي نسجت حولها.

- هذا يعني أن «الكمية» هي «الذرية» الجديدة؟

- تقريبًا. اضطر الدجالون إلى الانتقال إلى التفسيرات الكمية لأن حيلهم القديمة عادت لا تنفع. حقيقة استخدام الدجالين للسخافات «الكمية» تعني أن العامة باتوا أقل سذاجة مع الوقت. لكن حيلة الـ«كمية» ما زالت فعّالة لأن الناس لا يعرفون معنى النظرية الكمية.

- هذا يعني أن عليك تعليم النظرية الكمية لناس أكثر.

- تمامًا. ولذا كتبت هذا الكتاب.

- وأنا أساعد! أنا كلبة خدمة عامة!

- أنت كلبة رائعة.
- هذا يعني أن هذه نهاية الكتاب؟
- تقريبًا. لماذا؟
- إن كانت هذه النهاية، هل يمكننا التنزه؟
- حسنًا.
- وإن رأينا أي سنجاب شرير...
- إن رأينا سناجب شريرة، يمكنك عضها.
- مرحى!

معجم المصطلحات المهمة

ميكانيك الكم: أو الفيزياء الكمية أو النظرية الكمية، هو موضوع هذا الكتاب. طوِّر ميكانيك الكم في النصف الأول من القرن العشرين، وهو يصف سلوك الجزيئات والذرات والأجسام دون الذرية والضوء وتفاعلاتها فيما بينها.

الجسيمات الافتراضية: جسيمات تظهر في مخطط فاينمان وتختفي بسرعة عالية تمنعنا من قياسها مباشرة. تظهر بهيئة زوجين من جسيم اعتيادي وآخر مضاد وغالبًا ما يكون أحدهما إلكترونا والآخر بوزيترونًا. من حيث المبدأ، يمكن ظهور أي شيء بهيئة جسيمات افتراضية، حتى الأرانب المصنوعة من الجبن.

الفيزياء الحديثة: النظريات الفيزيائية المطورة بعد العام 1900 تقريبًا، وجوهرها النسبية وميكانيك الكم.

الفيزياء الكلاسيكية: النظريات الفيزيائية الموضوعة قبل العام 1900 تقريبًا، وتختص بدراسة سلوك الأشياء المعتادة. جوهرها قوانين نيوتن في الحركة ومعادلات ماكسويل في الكهربائية والمغناطيسية وقوانين الديناميكا الحرارية (الثرموداينمك).

النسبية: النظرية التي وضعها آينشتاين لوصف الجاذبية وسلوك الأجسام المتحركة بسرعات قريبة من سرعة الضوء.

مبدأ الريبة (مبدأ الريبة لهايزنبيرغ): أو مبدأ عدم اليقين أو عدم التحديد. إحدى العلاقات الرياضية التي تَحِدُّ الدقة التي تقاس بها بعض الخصائص. أشهر نسخة من هذا المبدأ بين الزخم والموقع، وتنص على استحالة معرفة الموقع الدقيق للأرنب، وسرعته الدقيقة. تسبب أي

محاولة لزيادة الدقة (تقليل الريبة) في الموقع تقليل الدقة (زيادة الريبة) في الزخم، والعكس صحيح. من العلاقات المهمة أيضًا مبدأ الريبة في الزمن والطاقة إذ إنه يَحِدُّ طول الوقت الذي توجد فيه الجسيمات الافتراضية حسب نظرية الكهروديناميكا الكمية.

قطة شرودنغر: تجربة فكرية قدمها إرفين شرودنغر لإيضاح عبثية التراكب الكمي. تخيل فيها قطة محبوسة في صندوق مع جهاز يحتمل بنسبة 50% أن يقتلها في غضون ساعة واحدة؛ حسب الفيزياء الكمية: بعد انقضاء الساعة، ستكون القطة ميتة وحية بالتساوي إلى أن تقاس حالتها. نصبته هذه التجربة بطلًا للكلاب الفيزيائية.

تفسير العوالم المتعددة: الإطار الفلسفي لميكانيك الكم الذي طوره هيو إيفرت الثالث من جامعة برينستون في الخمسينيات. يتلافى هذا التفسير مشكلة انهيار «الدالة الموجية» التي يعانيها تفسير كوبنهاغن بالقول إن جميع النتاجات المحتملة من قياس تحدث فعلًا، لكن في فروع مختلفة من الدالة الموجية، أي إن كل الكلاب تأكل اللحم في أحد فروع الدالة الموجية، لكننا -للأسف- لا نتسلم غير فرع واحد. أما الفروع الأخرى من الدالة الموجية فتمثل أكوانًا منفصلة معزولة بفضل عملية فك الترابط، التي تمنع الفروع المختلفة من التأثير في بعضها على نحوٍ ملموس.

الكهروديناميكا الكمية (QED): نظرية تصف التفاعلات بين الجسيمات المشحونة والضوء، وضعها ريتشارد فاينمان وجوليان شفينجر وشينيتشيرو توموناغا في وقت قريب من العام 1950. نسخة فاينمان هي الأشهر، وهي تمثل التفاعلات تبادلًا للجسيمات الافتراضية.

الظاهرة الكهروضوئية (التأثير الكهروضوئي): تأثير اكتشف في أواخر القرن التاسع عشر، يُخرج فيه الضوءُ الساقطُ على معدن إلكترونات. فسر آينشتاين هذا التأثير في العام 1905 بتطبيق فرضية بلانك الكمية على الضوء مباشرة واصفًا إياه سيلًا من الفوتونات.

القياس measurement: عانيت في ترجمة هذا المصطلح صراحة، فترجمته -في المسودة الأولى- قياسًا مرة ورصدًا مرة أخرى لأنه يَحتَمل المعنيين، قررت في النهاية ترجمته إلى «قياس» في كل المواضع التي ورد فيها لأجنبكم الالتباس، وأعتمد على تأنيكم عند القراءة. القياس الكمي هو عملية مؤثرة (أو فعّالة) في ميكانيك الكم تغير حالة النظام المقاس. يكون الجسم الكمي في حالة تراكب من جميع الحالات الممكنة قبل القياس، لكنه يكون في حالة واحدة وحسب بعد قياسه. يهب لنا تفسيري كوبنهاغن والعوالم المتعددة وصفين مختلفين لما يحدث في أثناء القياس.

ازدواجية موجة-جسيم (الازدواجية الموجية الجسيمية): خصيصة لميكانيك الكم، حيث يمتلك الجسم خصائص الجسيم والموجة معًا. تنص الفيزياء الكلاسيكية على أن الضوء موجة، في حين تقول الفيزياء الكمية إنه سيل من الجسيمات (الفوتونات). كذلك تنص الفيزياء الكلاسيكية على أن الإلكترون جسيم، في حين تقول الفيزياء الكمية إن له طولًا موجيًا يتناسب وزخمه. الحقيقة أن الإلكترون والفوتون هما «جسيمات كمية»، وهي نوع ثالث من الأشياء لا هي بالجسيم ولا الموجة، بل ذات خصائص مختلطة.

الحيود: سلوك خاص بالموجات، حيث تنتشر الموجات العابرة من فتحة ضيقة (أو المتجاوزة عائقًا) في الجانب الآخر. يمكن لكلبةٍ جالسة في غرفة المعيشة سماع صوت اصطدام قطعة بطاطا مقرمشة بأرضية المطبخ، بفضل حيود موجات الصوت عبر باب المطبخ وارتدادًا عن الأركان.

الزخم: كمية مرتبطة بالحركة تحدد ما يحدث للجسم عند الاصطدام. يساوي الزخم حاصل ضرب الكتلة بالسرعة في الفيزياء الكلاسيكية ($p=mv$)؛ وحسبها ينبغي لكلب شيواوا صغير أن يتحرك أسرع من كلب دنماركي ضخم إن أراد تحصيل نفس زخمه. يحدد زخمُ الجسيم طولَه الموجي في الفيزياء الكمية (حسب معادلة دي برولي $\lambda = h/p$).

التداخل: ظاهرة تحدث عندما تجتمع موجتين. إن تطابقت قمة الموجة الأولى وقمة الثانية (في ذات الطور) كانت النتيجة موجة أكبر من أي منهما. وإن تطابقت قمة الموجة الأولى وقعر الأخرى (بطور مختلف) كانت النتيجة لا موجة (تختفيان). يمثل نمط تداخل الجسيمات المفردة أفضل إثبات للسلوك الكمي.

الإشعاع الحراري: يسمى كذلك «إشعاع الجسم الأسود»، وهو الضوء الذي يشعه جسم ساخن، مثل الضوء الأحمر المتوهج المميز لمعدن مسخن. يعتمد طيف هذا الضوء على حرارة الجسم لا غير. وأدت محاولة ماكس بلانك لتفسير هذا الطيف إلى نشوء ميكانيك الكم.

الطاقة: مقياس قدرة الجسم على تغيير حركته أو حركة جسم آخر. للطاقة صور كثيرة منها الحركية والكامنة وطاقة الكتلة ($E=MC^2$)؛ ويمكن تحويلها بين صورة وأخرى، لكن يستحيل خلقها أو إفنائها.

ثابت بلانك: الثابت الذي يصل الطاقة بالتردد أو الزخم بالطول الموجي في الفيزياء الكمية. رمزه وقيمته $h=6.6261\times10^{-34}$ J.s (34 صفرًا إلى يسار القيمة قبل الفاصلة!) وهذه الرقم لصغير بحق.

الفوتون: جسيم من الضوء. يمكن التفكير في شعاع الضوء بأنه سيل من الجسيمات، مثل الحبوب التي تصب في وعاء كلبة. لكل فوتون طاقة تساوي حاصل ضرب ثابت بلانك بتردد لون الضوء ($E=hf$).

الدالة الموجية: دالة رياضية يمثل مربعها احتمالية إيجاد الجسم في أي من حالاته المسموح بها. كل الأجسام توصف بدوال موجية في ميكانيك الكم.

حالة (حالة كمية): مجموعة معينة من الخصائص (موقع وسرعة وطاقة...) التي تصف جسمًا. على سبيل المثال، «نائمة في غرفة المعيشة» و«نائمة في المطبخ» و«تركض حول المنزل» هي ثلاث حالات ممكنة لكلبة.

حجة نصف كلاسيكية: وصف لنظام فيزيائي يستند بمعظمه إلى الفيزياء الكلاسيكية، لكن ببعض الأفكار الحديثة المضافة حسب مقتضى الحال. مثال على النماذج نصف الكلاسيكية «مجهر هايزنبيرغ» ونموذج بور للهيدروجين.

الاحتمالية: تصف الدالة الموجية لجسم كمي احتمالية إيجاد الجسم في أي من حالاته المتاحة عندما يقاس. على سبيل المثال، هناك احتمالية عالية لإيجاد الكلبة في المطبخ، واحتمالية عالية لإيجادها في غرفة المعيشة، واحتمالية واطئة جدًا لإيجادها على الأريكة... إن كانت تعرف مصلحتها في الأقل.

الحالة المسموح بها (المتاحة): إحدى الحالات المحدودة التي يمكن أن يقاس فيها الجسم حسب ميكانيك الكم. على سبيل المثال، يمكن إيجاد كلبة ساكنة على الأرض أو على الأريكة (حالتان متاحتان، مسموح بهما)، لكن لا يمكن إيجادها على مسافة ما بين الأرض والأريكة (حالة غير متاحة، غير مسموح بها).

النفق الكمي (النفقية): ظاهرة كمية يعبر فيها الجسيم من حاجز ويظهر في الجانب الآخر، رغم أنه لا يمتلك الطاقة الكافية للعبور. مثل كلبة سيئة تحفر حفرة تحت سور.

طاقة النقطة الصفرية: كمية الطاقة الضئيلة الموجودة دائمًا في الأجسام الكمية بسبب الطبيعة الموجية للمادة. لا يمكن أن تكون الجسيمات الكمية المقيدة في حالة سكون تام؛ إنها كجراء في سلة، دائمًا تتلوى وتتدحرج وتتحرك قليلًا، حتى عند نومها.

التشابك: «اتصال» كمي بين جسمين حالتيهما مترابطتين فيحدد قياس أحدهما حالة الآخر. تُشَبَّه كلاسيكيًا بكلبين في ذات الغرفة: فإما كلاهما مستيقظ وإما كلاهما نائم. إن قست أحد الكلبين وكان مستيقظًا فإن الآخر سيكون مستيقظًا حتمًا، توجد هكذا ارتباطات في الجسيمات الكمية، الفرق أن حالاتها غير محددة حتى يقاس أحد الجسيمين المتشابكين، حينها ستتحدد حالة الآخر تلقائيًا، بغض النظر عن المسافة بينها.

تفسير كوبنهاغن: الإطار الفلسفي الذي وضعه نيلز بور وزملاؤه في معهده في الدنمارك. يصر تفسير كوبنهاغن على تقسيم تام بين الأنظمة الصغروية (تختص بها الفيزياء الكمية) والأنظمة الكبروية (اختصاص الفيزياء الكلاسيكية). ويسبب التفاعل بين جهاز القياس الكبروي والنظام الكمي الصغروي «انهيارَ» الدالة الموجية إلى إحدى الحالات المسموح بها لذلك النظام.

معادلة شرودنغر: الصيغة الرياضية التي يستخدمها الفيزيائيون لحساب الدالة الموجية لنظام كمي معين، والتنبؤ بتغيره مع الزمن.

تجربة الممحاة الكمية: إثبات لتأثير القياس الكمي. حيث يدمر نمط التداخل بسبب إمكانية قياس المسار الذي يسلكه جسيم، لكنه يعاود الظهور بإضافة ما يشوش (يمحو) ذلك القياس للمسار.

الاستقطاب: خاصية للضوء، تتناسب واتجاه اهتزاز موجته في الفيزياء الكلاسيكية. يمكن تمثيل أي استقطاب بكونه تراكبًا من استقطابات أفقية وعمودية، وهو يحدد احتمالية مرور الضوء عبر المستقطب الأفقي أو

العمودي.

المُستَقْطِب (فلتر الاستقطاب): مادة تسمح بمرور الضوء المُستَقطَب بزاوية معينة، وتحجب الضوء المستقطب بزاوية تفرق عن الأولى بتسعين درجة. احتمالية مرور الضوء المستقطب بزاوية بينية (بين تلكما الزاويتين السابقتين) تتناسب وقيمة تلك الزاوية البينية.

فك الترابط: عملية تدمر قدرتنا على رؤية نمط التداخل لجسيم كمي بسبب تفاعلات عشوائية متقلبة مع البيئة. فك الترابط مهم لتفسير العوالم المتعددة خاصة، لأنه يعلل عدم تأثير الفروع المختلفة للدالة الموجية في بعضها.

الترابط: خاصية للموجات أو الدوال الموجية، يمكن تعريفها تقريبيًا بكونها تصرف الموجات كما لو أنها صادرة من ذات المصدر. تنتج إضافة موجتين مترابطتين نمط تداخل واضح، لكن ينتج عن إضافة موجتين غير مترابطتين نمطًا سريع التحول ينتشر ويتشوش فلا يمكن تمييزه. تدمر عملية «فك الترابط» الترابط بين موجتين من ذات المصدر عبر تفاعلات عشوائية متقلبة مع المحيط.

تأثير زينون الكمي: إثبات لتأثير القياس الكمي، حيث يُمنع تغيير الجسم لحالته عبر قياسها باستمرار. المكافئ الكلاسيكي له كلبة تمنع مالكها من النوم بإلحاحها في سؤال: هل أنت نائم؟

الاستجواب الكمي: تقنية توظف تأثير زينون الكمي لرصد وجود جسم دون جعله يمتص ولو فوتونًا. تطبيقاتها في صيد الأرانب واضحة لكل كلبة وكلب.

الطاقة الكامنة: الطاقة المرتبطة بجسم لا يتحرك حاليًا لكن له القدرة على التحرك. للكلبة طاقة كامنة في كل وقت، حتى وهي نائمة؛ إذ يمكنها الوثب والنباح فور سماع أدنى صوت.

الطاقة الحركية: هي طاقة الجسم المتحرك. للأجسام المألوفة التي تتحرك بسرعات اعتيادية، تساوي الطاقة الحركية حاصل ضرب نصف كتلتها بمربع سرعتها ($½mv^2$). الطاقة الحركية للكلب الدنماركي الضخم أكبر منها لكلب الشيواوا الصغير وإن كانا يتحركان بالسرعة نفسها (لأن كتلة الكلب الدنماركي أكبر)، والطاقة الحركية لكلب الهسكي السيبيري النشيط أكبر منها لكلب البلودهاوند الناعِس وإن كانا بالكتلة نفسها (لأن سرعة الهسكي أكبر).

حفظ الطاقة: ينص قانون حفظ الطاقة على إمكانية تحويل الطاقة من صورة إلى أخرى، لكن الطاقة الكلية لنظام معزول تظل نفسها في كل أوان. على سبيل المثال، يمكن لكلبة تحويل الطاقة الكامنة في الطعام إلى طاقة حركية بمطاردتها السناجب، لكن لا يمكن لها اكتساب طاقة حركية أكثر من الطاقة الكلية المتاحة في طعامها.

مفارقة آينشتاين وبودولكسي وروزن (مفارقة إي بي آر): بحث كتبه هؤلاء الثلاثة متعللين بالجسيمات المتشابكة لإثبات نقص ميكانيك الكم. ثبت خطأ قولهم بالتجارب التي وظفت مبرهنة بل، رغم ذلك فإنه أدى إلى تطوير الانتقال الفوري الكمي وتقنيات معلوماتية كمية أخرى.

مبرهنة بل: مبرهنة رياضية أثبتها جون بل، تظهر أن حالات الجسيمات الكمية المتشابكة مترابطةٌ بطرائق تعجز أي نظرية متغير خفي محلي عن محاكاتها.

نظرية المتغير الخفي المحلي (LHV): نظرية من النوع الذي يفضله آينشتاين وبودولسكي وروزن. تقول هذه النظريات إن القياسات في موقع ما مستقلة تمامًا عن القياسات في المواقع الأخرى («محلية»)، والجسيمات في حالة محددة دائمًا رغم أن قيمها المحددة تلك غير معروفة («متغير خفي»). لا يمكن لهكذا نظريات مجاراة كل التنبؤات الكمية (حسب مبرهنة بل)، وأثبت ألان أسبيه -وغيره- بطلانها تجريبيًا.

نظرية المجال الكمي: نظرية تجمع ميكانيك الكم والنسبية، لوصف الجسيمات التي تتحرك بسرعات قريبة من سرعة الضوء والتفاعلات التي تحدث بينها. أيسر نسخة منها الكهروديناميكا الكمية.

الانتقال الفوري الكمي: آلية لنقل الحالة الكمية الدقيقة لجسيم كمي من مكان لآخر دون قياسه أو تحريكه؛ وذلك باستخدام الجسيمات المتشابكة. للأسف، لا يمكن أن تستخدمها الكلاب لتنتقل إلى حيث يمكنها صيد السناجب بيسر.

الحاسوب الكمي: حاسوب مصنوع من «كيوبتات» يمكنها أن تكون بقيمة «1» و«0» كما في بتات الحواسيب التقليدية، ويمكنها أيضًا الحلول في حالة تراكب من هاتين القيمتين. يمكن لهذه الحواسيب حل نوع معين من المسائل (مثل تعميل أرقام كبيرة) أسرع بكثير مما تستطيع الحواسيب التقليدية. تمثل الصعوبة في تعميل الأعداد الكبيرة أساس التشفير الحديث، لذا يمكن للحاسوب الكمي أن يتيح لسنجاب شرير اختراق عمليات بطاقة ائتمانك وتصفير حسابك المصرفي في شراء حبوب الطيور.

مبرهنة منع النسخ: مبرهنة رياضية تثبت استحالة صنع نسخة تامة من جسيم كمي، دون معرفة حالته مسبقًا.

المادة المضادة: لكل جسيم في الكون مادة مضادة مكافئة، تطابقه في الكتلة وتعاكسه في الشحنة. حين يصدم جسيمُ مادة عادية جسيمَ مادة مضادة، فإنهما يفنيان وتتحول كتلتيهما إلى طاقة.

ريبة الطاقة والزمن: نوع آخر من مبدأ الريبة لهايزنبيرغ، ينص على استحالة معرفة الطاقة الدقيقة لجسيم والوقت الدقيق الذي قيست فيه. وهذا يحد عمر الجسيمات الافتراضية في نظرية الكهروديناميكا الكمية.

إشعاع هوكينغ: عملية تسبب الجسيمات الافتراضية بتبخر الثقب الأسود. حين يظهر زوجا مادة-مادة مضادة قرب ثقب أسود، يقع أحدهما في الثقب الأسود ويفلت الآخر. يجب على الثقب الأسود عندها فقدان طاقة خضوعًا لقانون حفظ الطاقة. وهكذا تقل كتلة الثقب الأسود جسيمًا تلو جسيم.

مخطط فاينمان: صورة تمثل سلسلة أحداث ممكنة لجسيم مشحون يتفاعل مع الضوء. يمثل كل مخطط حسابًا في نظرية الكهروديناميكا الكمية، وتحسب طاقة الجسيم المتفاعل بإضافة جميع المخططات الممكنة له. سميت المخططات تيمنًا بريتشارد فاينمان الذي اخترعها اختصارًا للحساب.

نسبة مغناطيسية دورانية (عامل جي): رقم (رمزه جي) يحدد طريقة تفاعل الإلكترون والمجال المغناطيسي. تتنبأ أيسر نظرية لميكانيك الكم أن هذا العامل يساوي 2، لكن نظرية الكهروديناميكا الكمية تقول إنه أكبر قليلًا. وثبت بالتجربة تطابق عامل جي وتنبؤات نظرية الكهروديناميكا الكمية حتى أربعة رقمًا عشريًا.

مناهل للاستزادة

«*الريبة: آينشتاين وهايزنبيرغ وبور والصراع بشأن روح العلم*» لديفيد ليندلي. يوفر هذا الكتاب مدخلًا سهلًا إلى تاريخ النظرية الكمية المبكر، وفيه تفصيل للمناظرات عن النظرية ومعنى مبدأ الريبة.

«*عصر التشابك: حين ولدت الفيزياء الكمية من جديد*» للويزا غيلدر. يشابه هذا الكتاب في بعض مواضيعه كتاب الريبة أعلاه، لكنه يتمعن في التشابك، ويسهب في نظرية المتغير الخفي اللامحلي لديفيد بوم ومبرهنة بل وأولى الفحوص التجريبية لفكرة اللامحلية. قوام الكتاب مجموعة محادثات لبعض الشخصيات المهمة، والتي أعيد هيكلتها واقتصت وجمعت من مذكرات ورسائل.

«*اختبارات الزمن: قراءات في تطور النظرية الفيزيائية*» الذي حرره آرثر ف. جيانيلي وغلين ن. ستاتيل وليزا م. دولينغ. يجمع هذا الكتاب العديد من الأوراق العلمية الكلاسيكية بشأن النظرية الكمية، بضمنها نموذج بور الأصلي لذرة الهيدروجين، وبحث آينشتاين وبودولسكي وروزن ورد فعل بور عليه، إضافة إلى مبرهنة جون بل الشهيرة.

«*نظرية كل شيء تقريبًا: النموذج العياري والانتصار المجهول للفيزياء الحديثة*» لروبرت أورتر. بين غلافي هذا الكتاب استعراض عام رائع لوضع الفيزياء الحديثة، يشمل النظرية الكمية الأساسية ونظرية الكهروديناميكا الكمية ومشاكل فيزياء الجسيمات التي لم أناقشها في هذا الكتاب.

«*الكهروديناميكا الكمية: النظرية العجيبة للضوء والمادة*» لريتشارد فاينمان. في طيات هذا الكتاب تفسير حسن سلس لتفاصيل الكهروديناميكا الكمية. ورغم أن كتب السيرة الذاتية لفاينمان مثل «بالطبع أنت تمزح يا سيد فاينمان» و«ما همك بما يرى الآخرون؟» ليس فيها نفس القدر من الفيزياء، فإنها ممتعة بحق.

«*التحدي الكمي، النسخة الثانية: بحث حديث في أسس ميكانيك الكم*» لجورج غرينشتاين وآرثر ج. زاينس. أحسن الكاتبان في كتابهما هذا استعراض العديد من التجارب التي أثبتت السمات الغريبة لميكانيك الكم. وهذا الكتاب إنما أرشحه لهواة الفيزياء المهتمين بالرياضيات.

«العبقري: حياة ريتشارد فاينمان وعلمه» لجيمس جليك. يتناول هذا الكتاب تطور نظرية الكهروديناميكا الكمية، والتنافس بين ريتشارد فاينمان وجوليان شفينجر.

مسرحية «*كوبنهاغن*» لمايكل فرين. توظف هذه المسرحية الأفكار الكمية لاستكشاف الخلاف الشديد الشهير بين نيلز بور وفيرنر هايزنبيرغ.

قصص «*سيد تومبكينز*» لجورج جاموف. هذه القصص هي الاستكشاف المرح الأصلي للفيزياء الحديثة، بتوظيفها أحلام اليقظة لموظف متواضع في أحد المصارف. لا يمكن أن يغفل كتاب فيزيائي فيه كلبة ناطقة عن ذكرها.

شكر وتقدير

تعلمت الفيزياء الواردة في هذا الكتاب من أساتذة وزملاء كثر في مدة تناهز العشرين عامًا. أقدم شكري لبل فيليبس وستيف رولستون، وبول ليت وكريس هيلمرسون، وإيفان دويتش وإفرايم شتاينبرغ، ولويس أوروزكو وبول كويات، ومارك كاسيفيتش وديف ديميل، وسيفي ماليكي وكيفن جونز، وجيف ستريت وستوارت كرامتون وبل ووترز. لهم الفضل في كل تفسير حسن كتبته، واتحمل وحدي أي خطأ أخطأته.

حظيت بكثير من التعليقات المفيدة بشأن مسودة الكتاب من قرائي الأوائل الباسلين: جين أتشيسون وليزا باو، وآرون بيرغمان وشون كارول، ويون ها لي ومات ماكيرفين وفرانسس موفيت. ولا أنسى الملاحظات المفيدة لمايكل نيلسون وديفيد كايزر. كلهم ساهم في تحسين الكتاب، وما كان ليكون جيدًا لولاهم.

كانت بذرة الكتاب مجموعة مقالات بعنوان «مبادئ الريبة» في مدونتي:

http://scienceblogs.com/principles/

وصارت الحوارات الاستهلالية في الفصلين الرابع والتاسع. أشكر الرفاق في ساينس بلوغز وهم كريستوفر ميمز وكاثرين شارب وإيرين جونسون وإريكيا ميليكان لتوفير منصة لي، وأشكر كوري دوكتورو من موقع بوينغ بوينغ ومن في موقع دِغ لترويج تلك المنشورات. ويستحق باريت غاريز وإرين هوزير وباتريك نيلسون هايدين الشكر لإقناعي أن كتابة كتاب فيزيائي فيه كلبتي فكرة سديدة. وبالطبع أشكر محرر كتابي بيث ويرهام والعميل إيرين هوزير لجهودهما في نمذجة الكتاب ومساعدتي في اكتشاف آلية النشر، التي تختلف كثيرًا عن أي شيء في الفيزياء.

تبنيت إيمي من ملجأ Mohawk & Hudson River Humane Society في ميناندز في نيويورك، موقعهم الإلكتروني:

http://www.mohawkhumanesociety.org/

إنهم مصدر لكلاب رائعة (وحيوانات أليفة أخرى) أسوة بسائر ملاجئ الحيوانات. أنصح الراغبين في الكلاب بزيارة ملاجئهم المحلية. كان حظي جيدًا إذ تعرفت بكلاب كثيرة، منها باتشِس وروري وترومان، وآردي الميت حديثًا، وبودي وتينكر وأخيرًا كوين اوف نيسكيونا. وضعت شيئًا من كل منهم في هذا الكتاب. لكن يعود أغلب الفضل إلى إيمي، وهي أفضل إيمي على الإطلاق، وملكة نيسكيونا.

جزيل الشكر لأصدقائي وعائلتي، الذين كانوا شديدي الدعم رغم غرابة الأمر لهم. وأخيرًا، وأبعد ما يكون عن آخرًا، الشكر لزوجتي كيت نيبفيو لقراءة مسودات لا تحصى، ولتصحيح قواعدي بلطف، ولاستماعها إليَّ بصبر وأنا أتبجح وأقلب الأفكار، ولوهبها لي طفلتي كلير التي عقدت الأمور بأجمل طريقة ممكنة. وأكثر شكري لها لإلهامي العزيمة على الاستمرار بضحكها على محادثاتي السخيفة مع الكلبة. ما كان هذا العمل ليتم لولاها، حرفيًا.